

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DA MADEIRA DEVIDA AO SEU COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO

Nuno Cláudio de Carvalho Mendes Machado

Licenciado em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para obtenção do grau de
Mestre em Construção de Edifícios pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

JUNHO 2006

Dedicatória

À Carla

e ao João Nuno.

Agradecimentos

Ao terminar este trabalho quero manifestar o meu agradecimento a todos aqueles que, ao longo de vários meses e a diferentes níveis, contribuíram para a sua realização.

Desejo, no entanto, destacar o apoio, a confiança e a orientação recebidos do Prof. Vasco Peixoto de Freitas a quem manifesto o meu profundo agradecimento.

Quero também salientar a crítica certa e o apoio do Eng.º Nuno Ramos deixando aqui expresso o meu reconhecimento.

Caberá também realçar a atenção que me foi dada no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde me foram disponibilizados vários equipamentos e onde realizei os trabalhos experimentais.

Os apoios recebidos de muitos colegas, de Professores da Secção de Construções Cíveis e da empresa fornecedora dos provetes, foram sem dúvida indispensáveis à concretização deste trabalho.

Resumo

A humidade é uma das causas fundamentais da patologia da construção. A degradação do comportamento dos materiais pode ficar a dever-se à água no estado líquido ou à água no estado de vapor. A madeira apresenta um forte comportamento higroscópico, isto é, o seu teor de humidade e as suas dimensões são fortemente influenciadas pela humidade relativa da ambiência em que está colocada.

No presente trabalho estudaram-se as propriedades que caracterizam a variação dimensional da madeira face à acção da temperatura e à acção da humidade. Essas propriedades concentram-se principalmente na dilatação térmica linear, na higroscopicidade, na retracção e na expansão hídrica.

Foi necessário planear e conceber um dispositivo para efectuar os ensaios experimentais sobre provetes de madeira, constituído por sensores de deslocamento e tabuleiro de suporte dos sensores e dos provetes, instalado no interior de uma câmara climática existente.

Realizaram-se ensaios sobre provetes de madeira, nomeadamente, a determinação da expansão hídrica e a determinação da curva higroscópica, utilizando o dispositivo experimental implementado no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Com a investigação desenvolvida foi possível medir a variação dimensional da madeira em função da humidade relativa.

Abstract

Moisture is one of the most important causes for building pathology. Material's behaviour degradation can be affected by the presence of water both in vapour and liquid phase. Wood has a strong hygroscopic behaviour, with a strong variation of moisture content and dimension stability caused by modifications of the relative humidity of the surrounding air.

The properties that define the behaviour of wood facing temperature and moisture actions were studied in this work. Linear thermal expansion, hygroscopicity, shrinkage and hygric expansion were given special attention.

An experimental device was planned and designed for testing wood samples. Displacement sensors were attached to a supporting tray and the complete set was installed in an existing climatic chamber.

A series of tests was performed on wood samples, including the determination of hygric expansion coefficient and the definition of the sorption curve, using the facilities of the Laboratory of Building Physics in the Faculty of Engineering of Porto University.

This research made possible the evaluation of dimensional stability of wood facing transient conditions of the air's relative humidity.

Índice

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Antecedentes	2
1.3	Objectivos	4
1.4	Apresentação do Conteúdo da Dissertação.....	4
Capítulo 2	Propriedades que Caracterizam a Variação Dimensional da	
	Madeira	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Acção da Temperatura	5
2.2.1	Coeficiente de Dilatação Térmica Linear α_t	5
2.2.2	Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear	6
2.2.3	Coeficientes de Dilatação Térmica de Vários Materiais de	
	Construção	7
2.3	Acção da Humidade	8
2.3.1	Estrutura da Madeira.....	8
	2.3.1.1 <i>Estrutura Anatómica</i>	8
	2.3.1.2 <i>Princípios Gerais</i>	10
	2.3.1.3 <i>Princípios Especiais</i>	10
2.3.2	Teor de Humidade.....	19
	2.3.2.1 <i>Determinação do Teor de Humidade de Placas de</i>	
	<i>Derivados de Madeira</i>	22
	2.3.2.2 <i>Determinação do Teor de Humidade da Madeira</i>	22
2.3.3	Higroscopicidade – Curvas Higroscópicas	24
	2.3.3.1 <i>Determinação da Curva Higroscópica</i>	25

2.3.3.2	<i>Métodos de Ajuste a Curvas Higroscópicas.....</i>	25
2.3.3.3	<i>Curvas Higroscópicas de Vários Materiais de</i> <i>Construção</i>	29
2.3.3.4	<i>Curva Higroscópica da Madeira</i>	31
2.3.4	Secagem	32
2.3.5	Relação entre a Massa Volúmica e o Teor de Humidade.....	34
2.3.5.1	<i>Determinação da Massa Volúmica da Madeira</i>	34
2.3.5.2	<i>Placas de Derivados de Madeira</i>	35
2.3.5.3	<i>Madeira Maciça</i>	35
2.3.6	Retracção.....	37
2.3.6.1	<i>Retracção da Madeira</i>	37
2.3.6.2	<i>Determinação da Retracção da Madeira.....</i>	42
2.3.7	Coeficiente de Expansão Hígrica.....	43
2.3.7.1	<i>Determinação do Coeficiente de Expansão Hígrica....</i>	43
2.3.7.2	<i>Coeficientes de Expansão Hígrica de Vários</i> <i>Materiais de Construção</i>	48
2.3.8	Minimização da Variação Dimensional.....	49
Capítulo 3	Descrição do Dispositivo Experimental Desenvolvido	51
3.1	Constituição do Dispositivo Experimental	51
3.2	Características dos Diversos Componentes	52
3.2.1	Câmara Climática.....	52
3.2.2	<i>Data Logger</i>	53
3.2.3	Sensores LSC/LDS	56
3.2.4	Tabuleiros para Suporte dos Sensores e dos Provetes de	
	Madeira	57
3.2.5	Computador.....	59
3.3	Manual de Funcionamento	60
3.3.1	Configuração do <i>Data Logger</i>	60
3.3.2	Escalonamento e Calibração dos Sensores LSC/LDS.....	61
3.3.3	Programa de Recolha e Gestão de Dados	64
3.3.4	Configuração da Câmara Climática	66

3.3.5 Configuração dos Sensores LSC/LDS.....	82
Capítulo 4 Medição da Variação Dimensional da Madeira	85
4.1 Objecto do Estudo Experimental.....	85
4.2 Ensaaios Realizados	86
4.2.1 Variação Dimensional.....	86
4.2.2 Determinação da Curva Higroscópica	93
4.2.3 Determinação da Expansão Hígrica	94
4.2.4 Determinação da Massa Volúmica.....	97
4.2.5 Relação entre Variação Dimensional, Humidade Relativa e Teor de Humidade.....	99
4.3 Análise dos Resultados Obtidos	101
Capítulo 5 Conclusões	103
5.1 Considerações Finais	103
5.2 Síntese Crítica dos Resultados.....	103
5.3 Desenvolvimento Futuro da Investigação neste Domínio	105
Referências Bibliográficas	107
Bibliografia	113
Anexo A Propriedades da Madeira	121

Lista de Figuras

Figura 1.1 — Teor de humidade de equilíbrio da madeira em função do local de aplicação [2].....	3
Figura 2.1 — Direcções fundamentais da madeira [6].....	9
Figura 2.2 — Representação esquemática dos planos fundamentais da madeira; A – resinosa (pinho bravo); B – folhosa (carvalho) [5].	9
Figura 2.3 — Fases de secagem da madeira [2].....	13
Figura 2.4 — Localização da água numa célula [1].....	14
Figura 2.5 — Curvas da humidade de equilíbrio da madeira [5].....	15
Figura 2.6 — Fenómeno de histerese [5].	16
Figura 2.7 — Variação dimensional nas três direcções [1].....	18
Figura 2.8 — Curva higroscópica típica a temperatura constante [11].	24
Figura 2.9 — Tipos diferentes de curvas higroscópicas [11].	26
Figura 2.10 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção e respectiva histerese [11].	28
Figura 2.11 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção de tijolos de barro vermelho de diferentes massas volúmicas [11].	30
Figura 2.12 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção do gesso e da argamassa de cimento com diversas relações A/C [11].	30
Figura 2.13 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção de diversas essências de madeira [11].	31
Figura 2.14 — Curvas higroscópicas da madeira a diferentes temperaturas.	32
Figura 2.15 — Ábaco de <i>Kollmann</i> [5] e [17].	36

Figura 2.16 — Diagrama de retracção [10].	39
Figura 2.17 — Empenos de peças serradas [5].	40
Figura 2.18 — Representação esquemática dos resultados da medição da variação dimensional hídrica [21].	45
Figura 2.19 — Representação esquemática do coeficiente de expansão hídrica em função do teor de humidade, obtido a partir de medições da extensão hídrica e da variação do teor de humidade [21].	47
Figura 3.1 — Constituição do dispositivo experimental.	52
Figura 3.2 — Câmara de ensaios climáticos <i>FitoClima 3600 EDTU</i> .	53
Figura 3.3 — <i>Data logger</i> .	54
Figura 3.4 — Sensor LSC.	56
Figura 3.5 — Esquema de um sensor LSC/LDS.	57
Figura 3.6 — Projecto do tabuleiro.	58
Figura 3.7 — Protótipo do tabuleiro.	59
Figura 3.8 — Recolha de dados em contínuo.	60
Figura 3.9 — Configuração da velocidade de transmissão de dados.	61
Figura 3.10 — Configuração da saída de dados.	61
Figura 3.11 — Esquema de escalonamento.	62
Figura 3.12 — Menus apresentados pelo <i>data logger</i> para o escalonamento.	63
Figura 3.13 — Ambiente gráfico do programa <i>MM-grafix</i> .	65
Figura 3.14 — Janelas de diálogo de instalação e verificação de portas de ligação ao <i>data logger</i> .	65
Figura 3.15 — Janela de diálogo de selecção da porta de ligação.	66
Figura 3.16 — Botões do controlador <i>ClimaPlus V</i> .	66
Figura 3.17 — Quadro principal do controlador <i>ClimaPlus V</i> .	67
Figura 3.18 — Quadro de Estado (<i>Status</i>) do <i>ClimaPlus V</i> .	68
Figura 3.19 — Quadros <i>Graph</i> e <i>Scale</i> do <i>ClimaPlus V</i> .	69
Figura 3.20 — Quadro <i>Setup</i> do <i>ClimaPlus V</i> .	70
Figura 3.21 — Quadro <i>Programs</i> do <i>ClimaPlus V</i> .	71

Figura 3.22 — Quadro de construção e/ou alteração de programas.	72
Figura 3.23 — Exemplo de um programa.	73
Figura 3.24 — Exemplo de um programa usando ciclos em segmentos.	74
Figura 3.25 — Quadro de alarmes.	75
Figura 3.26 — Quadro <i>Control Mode</i>	76
Figura 3.27 — Barra de ferramentas da aplicação <i>FitoLog</i>	77
Figura 3.28 — Quadro de diálogo <i>Configuration Setup</i> da aplicação <i>FitoLog</i>	78
Figura 3.29 — Quadro de diálogo <i>Graph</i> da aplicação <i>FitoLog</i>	79
Figura 3.30 — Quadro de diálogo <i>DataLog</i> da aplicação <i>FitoLog</i>	79
Figura 3.31 — Quadro de diálogo <i>Graph Options</i> da aplicação <i>FitoProgram</i>	80
Figura 3.32 — Sequência de quadros de diálogo na construção de um programa com a aplicação <i>FitoProgram</i>	81
Figura 3.33 — Resultado gráfico do programa criado.	82
Figura 3.34 — Sequência de menus apresentados pelo <i>data logger</i> para a configuração dos sensores.	84
Figura 4.1 — Variação dimensional dos provetes nas direcções tangencial e radial para cada patamar de humidade relativa.	86
Figura 4.2 — Esquema de medição dos provetes.	87
Figura 4.3 — Variação dimensional até à estabilização a 35 % de humidade relativa.	88
Figura 4.4 — Variação dimensional de 35 % a 50 % de humidade relativa.	88
Figura 4.5 — Variação dimensional de 50 % a 75 % de humidade relativa.	88
Figura 4.6 — Variação dimensional de 75 % a 90 % de humidade relativa.	88
Figura 4.7 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção tangencial do provete 1.	90
Figura 4.8 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção radial do provete 1.	91
Figura 4.9 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção tangencial do provete 2.	91

Figura 4.10 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção radial do provete 2.....	92
Figura 4.11 — Curvas higroscópicas dos provetes.	94
Figura 4.12 — Variação da extensão hídrica ε_h , e do coeficiente de expansão hídrica α_h	96
Figura 4.13 — Variação da extensão hídrica ε_h , e do coeficiente de expansão hídrica α_h	97
Figura 4.14 — Massa volúmica e massa volúmica de referência dos provetes.	99
Figura 4.15 — Representação conjunta das extensões hídricas em função da humidade relativa e do teor de humidade.	100

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 — Valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear de vários materiais de construção [4].	7
Tabela 2.2 — Classificação da madeira em função do seu coeficiente de retracção volumétrica α_v [5].	19
Tabela 2.3 — Normas para determinação do teor de humidade.	21
Tabela 2.4 — Expansão devida à temperatura e à humidade [22].	49
Tabela 3.1 — Escalonamento dos sensores.	63
Tabela 4.1 — Coeficientes das expressões de aproximação.	92
Tabela 4.2 — Teor de humidade dos provetes.	93
Tabela 4.3 — Dimensões dos provetes em função da humidade relativa.	95
Tabela 4.4 — Extensão hídrica para os diferentes intervalos de humidade.	95
Tabela 4.5 — Determinação do coeficiente de expansão hídrica.	95
Tabela 4.6 — Massa volúmica e massa volúmica de referência dos provetes.	98

Lista de Símbolos, Abreviaturas e Nomenclatura

Símbolo	Grandeza	Unidades
Maiúsculas latinas		
E	Módulo de desvio relativo médio	%
H	Teor de humidade ou teor em água	%
H_{equi}	Teor de humidade de equilíbrio	%
H_f	Teor de humidade final	%
H_i	Teor de humidade inicial	%
HR	Humidade relativa	%
PSF	Ponto de saturação das fibras, podendo em média ser considerado igual a 28 %	%
R	Radiação solar	W/m ²
S, TSF	Teor de humidade de saturação das fibras	%
V_1	Volume do provete húmido	cm ³
V_2	Volume do provete seco ao ar	cm ³
V_3	Volume do provete seco em estufa	cm ³
V_u	Volume do provete com um teor de humidade u	cm ³
Minúsculas latinas		
d_i	Dimensão inicial	mm; µm
h	Humidade relativa	%
h_e	Condutância térmica superficial exterior	W/(m ² ·°C)
l_1	Dimensão, numa dada direcção, do provete húmido	mm; µm
l_2	Dimensão, numa dada direcção, do provete seco ao ar	mm; µm

Símbolo	Grandeza	Unidades
l_3	Dimensão, numa dada direcção, do provete seco em estufa	mm; μm
m_u	Massa do provete com um teor de humidade u	g
m_h	Massa do provete húmido	g
m_s	Massa do provete seco	g
t	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
t_e	Temperatura exterior	$^{\circ}\text{C}$
t_{se}	Temperatura superficial exterior	$^{\circ}\text{C}$
u	Teor de humidade ou teor em água	%

Maiúsculas gregas

Δ_d	Variação dimensional	mm; μm
ΔL	Variação dimensional	mm; μm
Δt	Variação de temperatura	$^{\circ}\text{C}$

Minúsculas gregas

α_l	Coeficiente de dilatação térmica linear	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
α_s	Coeficiente de absorção solar	—
α_a	Coeficiente de retracção axial	%
α_h	Coeficiente de expansão higríca	%
α_r	Coeficiente de retracção radial	%
α_t	Coeficiente de retracção tangencial	%
α_v	Coeficiente de retracção volumétrica	%
ε_a	Retracção axial	%
ε_h	Extensão higríca	%
ε_r	Retracção radial	%
ε_t	Retracção tangencial	%
ε_v	Retracção volumétrica	%
ϕ, φ	Humidade relativa	%
ρ_{12}	Massa volúmica padrão, determinada com o teor de humidade de referência de 12 %	g/cm^3
ρ_u	Massa volúmica a determinada percentagem de teor de humidade u	g/cm^3

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Muitos edifícios apresentam patologias logo após a sua construção, nomeadamente fissuras nos acabamentos, deformação e rotura das juntas, e ocasionalmente, perda de aderência de materiais. Tais deficiências são sempre indesejadas.

Os mecanismos responsáveis por tais deteriorações são as deformações dos materiais devidas a variações do teor de humidade e a variações térmicas ou devidas a acções químicas. A fissuração e a deformação ocorrem quando são induzidas tensões nos materiais por restrição à deformação imposta pelos materiais adjacentes.

Em qualquer abordagem no projecto de edifícios reconhece-se a importância do conhecimento das características de estabilidade dimensional dos materiais.

Esta dissertação é um suplemento à discussão levada a cabo por outras entidades que se preocupam principalmente pelas deformações devidas a variações térmicas e a variações do teor de humidade dos materiais de construção. Não é de modo algum, um tema simples, e muita da informação acerca da inter-relação dos mecanismos envolvidos não está ainda disponível.

Contudo, existe conhecimento suficiente para permitir uma avaliação da natureza dos problemas que podem surgir, e através de projectos e construções bem elaborados, podem evitar-se algumas causas mais óbvias de insucesso.

1.2 Antecedentes

Desde o Paleolítico a madeira tem sido um dos mais importantes materiais usados desde mobiliário, armas e até objectos de arte. O aparecimento de ferramentas de metal por volta de 5000 anos a.C. deu aos egípcios a possibilidade de melhorar a arte de cortar peças de madeira para usar na construção [1].

Enquanto que o uso da madeira e as técnicas de processamento foram sendo desenvolvidas durante centenas de anos, o conhecimento científico do comportamento da madeira é relativamente recente.

A aplicação de madeira em construções antigas era muito frequente, e a experiência acumulada de muitos anos permitia que a madeira se comportasse relativamente bem, através da utilização, por exemplo, de soalhos arejados.

Apesar das técnicas de tratamento terem sido melhoradas, têm vindo a acontecer, em construções novas, problemas em tectos e pavimentos de madeira. O problema depende fundamentalmente da humidade relativa ambiente elevada provocado pelos seguintes factores:

- melhoramento da estanquidade das janelas, e ausência de admissão de ar alternativa, diminuindo dessa forma a taxa de renovação do ar;
- aquecimento inexistente ou descontínuo, provocando temperaturas baixas próximas da temperatura de ponto de orvalho, com consequente condensação nas superfícies mais frias;
- aumento de produção de vapor no interior das habitações através da forma de cozinhar ou de extracção mecânica insuficiente nas cozinhas e no equipamento de engomar a vapor. Muitos extractores são ruidosos e por isso são ligados para funcionarem com uma velocidade baixa, que acaba por ser insuficiente, ou simplesmente não são ligados.

Importa ter em atenção que a madeira seca a um nível apropriado para o seu uso final deve ser aprovisionada de tal modo que as variações de humidade sejam mínimas. A madeira, em pilha fechada em local seco e sob coberto,

pode ser a provisionada durante uma semana ou duas sem grandes variações de humidade, embora as folhosas permeáveis e as resinosas adsorvam a humidade mais rapidamente que as folhosas menos permeáveis [2].

Assim, a madeira para pavimentos, carpintaria de limpos, caixilharia, mobiliário fixo ou outras madeiras que sejam fornecidas com baixos teores de humidade devem sempre ser aplicadas só após a secagem dos restantes materiais de construção, nomeadamente betonilhas e rebocos.

Exceptuando algumas espécies particularmente duráveis, a madeira, devido à sua constituição, é susceptível de degradação por agentes biológicos, nomeadamente fungos e insectos, dependendo o seu desenvolvimento das condições higrotérmicas a que o material é sujeito (Figura 1.1).

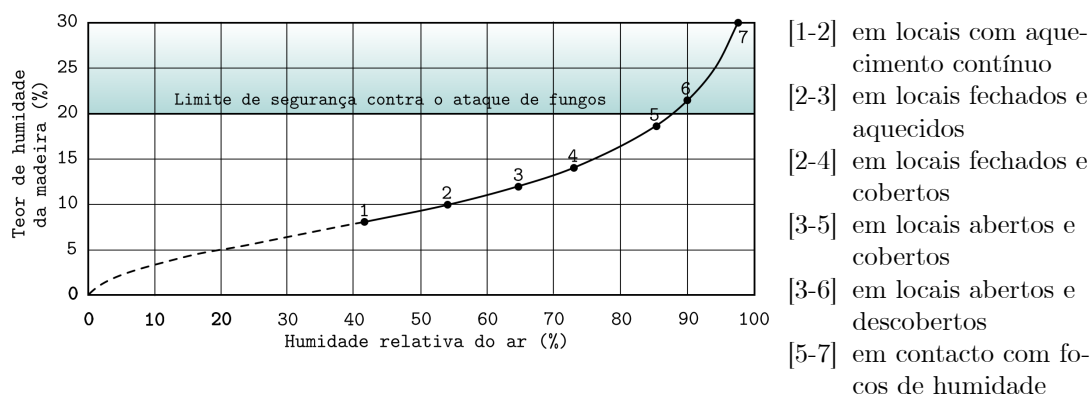


Figura 1.1 — Teor de humidade de equilíbrio da madeira em função do local de aplicação [2].

O teor de humidade é um factor condicionante do desenvolvimento dos agentes biológicos, podendo afirmar-se que é necessário um teor de humidade superior a 20 % para o desenvolvimento de fungos ou de térmitas subterrâneas. Pode dizer-se que em Portugal continental a madeira seca apenas pode ser atacada por carunchos.

1.3 Objectivos

Os principais objectivos deste trabalho podem sintetizar-se da seguinte forma:

- Estudar a influência da humidade relativa na variação dimensional da madeira, e respectiva quantificação dos coeficientes de expansão;
- Concepção e montagem de um dispositivo para determinação da variação dimensional utilizando uma técnica que permite medir o fenómeno de uma forma dinâmica e contínua, existindo a possibilidade de controlo das condições ambientais e visualização das leituras em computador remoto;
- Caracterização experimental das principais propriedades da madeira a partir do método desenvolvido.

1.4 Apresentação do Conteúdo da Dissertação

O texto encontra-se subdividido em 4 partes:

- A primeira parte (Capítulo 2), de carácter descritivo, pretende desenvolver o estado da arte enumerando diversas propriedades dos materiais de construção que influenciam, de certa maneira, o seu comportamento relativamente à humidade e à temperatura, focando-se ainda formas de tratamento ou de minimização dos problemas causados pela variação dimensional.
- A segunda parte (Capítulo 3) corresponde à descrição da concepção e funcionamento dos aparelhos utilizados nos ensaios sobre provetes de madeira na determinação de algumas propriedades, sendo a variação dimensional aquela de maior interesse neste estudo
- A terceira parte e última parte (Capítulo 4), de carácter experimental, descreve-se a técnica que foi utilizada na determinação da variação dimensional da madeira, mostram-se e comentam-se os resultados obtidos.

Capítulo 2

Propriedades que Caracterizam a Variação Dimensional da Madeira

2.1 Introdução

As deformações dos materiais e dos elementos de construção podem ser devidas a múltiplas causas:

- Aplicação de cargas resultando deformações elásticas e não elásticas;
- Variações de temperatura resultando dilatações e contracções;
- Variações do teor de humidade resultando expansões e retracções;
- Acções químicas resultando variação de volume, geralmente expansões.

Embora cada uma das causas de variação dimensional apresentadas tenham importância semelhante, apenas as deformações devidas à temperatura e à humidade serão tratadas com maior profundidade nesta dissertação.

2.2 Acção da Temperatura

2.2.1 Coeficiente de Dilatação Térmica Linear α_l

Muitos materiais dilatam quando aquecidos e contraem quando arrefecidos. Para os materiais sólidos, o aumento de comprimento por unidade de comprimento por grau de temperatura é definido pelo coeficiente de dilatação térmica linear α_l .

Os valores do coeficiente de dilatação térmica linear para muitos materiais usados na construção foram determinados experimentalmente e estão disponíveis em manuais da especialidade.

A determinação da deformação linear devido ao efeito da temperatura é simples para qualquer material de construção cujos movimentos não estejam restringidos.

2.2.2 Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear

A título de exemplo, o princípio da determinação do coeficiente de dilatação térmica linear de materiais cerâmicos descrito em [3] consiste em medir a variação dimensional para um intervalo de temperatura entre a temperatura ambiente e 100 °C.

Será necessário um conjunto de equipamentos dos quais se destacam os seguintes:

- Um equipamento capaz de provocar um aquecimento de (5 ± 1) °C/min com uma distribuição de calor uniforme no provete;
- Extensómetros ou outros sensores capazes de medir pequenas variações dimensionais;
- Estufa ventilada capaz de atingir (110 ± 5) °C. Podem também ser utilizados fornos microondas ou de infravermelhos desde que se obtenham resultados semelhantes;
- Exsicador.

O procedimento de ensaio inicia-se com a secagem dos provetes em estufa até atingirem massa constante¹, isto é, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, intervaladas de 24 h, é menor que 0,1 %. O passo seguinte é manter os provetes à temperatura ambiente dentro do exsicador.

Usam-se os extensómetros para medir a variação dimensional dos provetes com uma resolução de 0,002 vezes o seu comprimento. Colocam-se os provetes instrumentados no equipamento de aquecimento e medem-se os provetes

¹ Os critérios para definir massa constante são variáveis de norma para norma dependendo do tipo de material a ensaiar e da propriedade a determinar.

com a resolução de 0,01 mm. Aquecem-se os provetes e medem-se os seus comprimentos para intervalos de temperatura de 15 °C.

O coeficiente de dilatação térmica linear, α_l , é expresso em 10^{-6} por grau *Celsius* ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), até uma casa decimal, de acordo com a expressão seguinte:

$$\alpha_l = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

em que:

L_0 — comprimento do provete à temperatura ambiente;

ΔL — aumento de comprimento do provete entre a temperatura ambiente e 100 °C;

Δt — aumento de temperatura;

2.2.3 Coeficientes de Dilatação Térmica de Vários Materiais de Construção

O comprimento L de um material varia, como se sabe, com a temperatura segundo uma lei que, em primeira aproximação, é linear:

$$L = L_0(1 + \alpha_l t) \quad \text{ou} \quad \Delta L = L_0 \alpha_l \Delta t.$$

Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear de vários materiais de construção.

Tabela 2.1 — Valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear de vários materiais de construção [4].

Materiais	$\alpha_l \times 10^{-6}$ ($^\circ\text{C}^{-1}$)	Materiais	$\alpha_l \times 10^{-6}$ ($^\circ\text{C}^{-1}$)	Materiais	$\alpha_l \times 10^{-6}$ ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Alumínio	23	Carvalho //	3	Invar ²	0,8
Aço	12	Carvalho \perp	58	Mármore	2
Aço inoxidável	16	Cobre	16,7	PVC	78
Abeto //	7	Ferro	11,7	Tijolo	4
Abeto \perp	54	Gesso	25	Vidro	5 a 10
Betão	6	Granito	8	Zinco	16

² (Abreviatura de invariável); liga metálica de 64 % de aço e 36 % de níquel, cuja dilatação pelo calor é muito pequena e que se utiliza em relojoaria.

Chama-se a atenção para o facto do α_l apresentar valores diferentes na madeira, em função da direcção de corte, sendo muito mais elevado na direcção perpendicular às fibras. Naturalmente que a madeira é o material que apresenta dilatações mais expressivas com a temperatura.

Pode estimar-se rapidamente as ordens de grandeza da dilatação dos materiais mais correntes: a dilatação para uma elevação da temperatura de 50 °C é de 0,6 mm/m para o aço, de 0,8 mm/m para o zinco, 1,2 mm/m para o alumínio, 0,2 mm/m para o tijolo e 0,3 mm/m no betão.

2.3 Acção da Humidade

2.3.1 Estrutura da Madeira

2.3.1.1 Estrutura Anatómica

Segundo *Albino da Carvalho* [5], todo o estudo da arquitectura anatómica requer a consideração de planos principais de observação, para revelação completa e espacial dos elementos constitutivos e respectiva avaliação biométrica. Consideram-se assim, três planos fundamentais de observação:

- plano transversal;
- plano radial;
- plano tangencial.

O primeiro define-se como perpendicular ao eixo axial da árvore, corresponde à secção recta do tronco, no qual se observam as formações cíclicas do lenho, denominadas camadas de crescimento³, bem como uma formação central, de cor mais intensa do que a coroa circular periférica, delimitada pela casca, que se denomina cerne, enquanto a parte restante se denomina borne.

Os outros dois planos longitudinais e paralelos ao eixo axial, são definidos, como radial por passar teoricamente pela medula e seccionar perpendicularmente as camadas de crescimento, e como tangencial por ser paralelo ao pla-

³ As camadas de crescimento também são identificáveis como anéis de crescimento ou anéis anuais.

no radial e consequentemente tangente ao contorno de uma qualquer camada de crescimento (Figura 2.1).

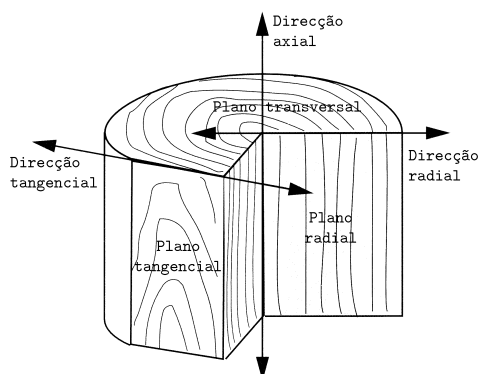


Figura 2.1 — Direções fundamentais da madeira [6].

Recorde-se, entretanto, que resinosas e folhosas têm estruturas substancialmente diferenciadas, resultantes da sua distinta evolução biológica (Figura 2.2).

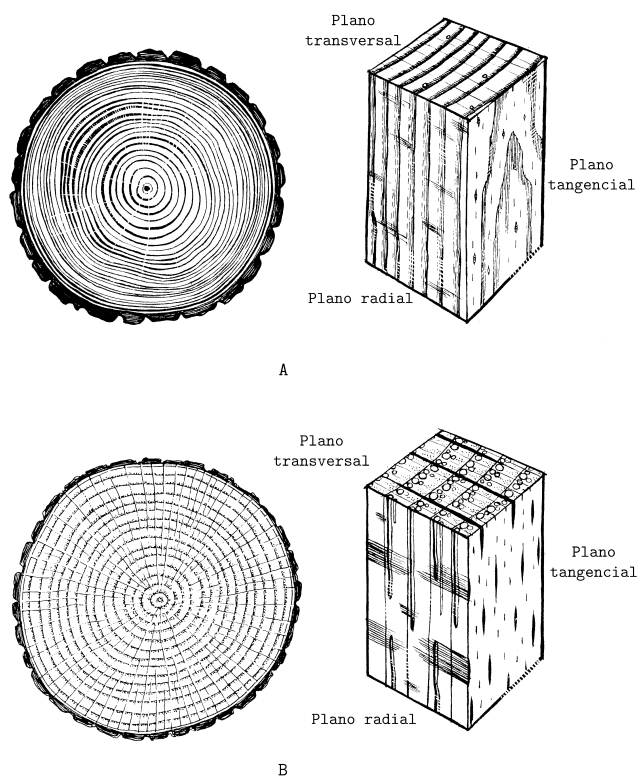


Figura 2.2 — Representação esquemática dos planos fundamentais da madeira; A – resinosa (pinho bravo); B – folhosa (carvalho) [5].

2.3.1.2 Princípios Gerais

A apresentação completa dos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais lenhosos tem uma ambição circunscrita de informação. Não basta, pois, que permita uma comparação fiável entre as várias espécies, o que é facilmente atingível quando se adopta a mesma metodologia de análise, ou seja, que os testes de qualificação sejam executados nas mesmas condições, quer no que respeita ao tipo dos provetes (concretamente em provetes limpos de defeitos que maior ou menor incidência possam ter no valor das propriedades ou características determinadas), quer no que respeita ao estado em que são submetidos às provas de avaliação de características (provetes com o mesmo teor de humidade dado que a madeira é um material higroscópico, consequentemente propenso a constante variação do teor de humidade com o ambiente que o rodeia, expressa em termos volumétricos e densimétricos). Como o estado higrométrico e a temperatura do ar envolvente condicionam o comportamento do material, a comparação entre diversas madeiras é válida quando feita à humidade padrão ($H = 12\%$) e a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura.

A madeira é também um material anisotrópico, ou seja de comportamento distinto consoante as direcções fundamentais dos seus elementos constitutivos principais (axial, tangencial e radial), a comparação entre espécies no que concerne a determinada propriedade, requer correcta orientação dos provetes, isto é, de fio direito e com faces transversal, tangencial e radial perfeitamente orientadas.

2.3.1.3 Princípios Especiais

Convencionalmente existe uma linguagem técnico-científica utilizada na caracterização do material lenhoso, familiar, portanto, aos especialistas, mas frequentemente desconhecida para o utilizador. Será necessário ou, pelo menos, conveniente, decodificar a terminologia, não só para ser mais fácil o entendimento dos valores, bem como uma articulação com importantes aspectos da utilização, da transformação, da laboração e da preparação dos referidos materiais.

Na caracterização do material lenhoso, em termos extremamente singelos, a árvore cresce em altura, na direcção axial (alongamento), e em diâmetro (engrossamento), por conjugação do aumento perimetral (tangencial) e do aumento diametral (radial).

Às três direcções fundamentais de crescimento do sistema correspondem orientações privilegiadas das células, com diferentes eixos principais: axial, tangencial e radial. Existem, pois, neste material três sentidos principais característicos, segundo os quais se estudam, se definem e se medem as propriedades reconhecidas unanimemente como específicas do material. Estes três sentidos que formam as arestas de um triedro de referência são:

- a) O sentido axial ou o sentido do fio da madeira, paralelo ao plano que contém o eixo de crescimento da árvore;
- b) O sentido radial, tomado numa secção recta ortogonal ao sentido axial e orientado segundo um raio desta secção, isto é, normalmente aos anéis anuais de crescimento aparentes na referida secção;
- c) O sentido tangencial igualmente tomado numa secção recta mas orientado tangencialmente aos sinais dos referidos anéis anuais.

Cada um destes eixos é perpendicular, respectivamente, ao plano transversal, plano tangencial e plano radial.

Em termos absolutos, portanto, a espessura das paredes celulares, principal repositório da substância lenhosa da madeira e sua quantidade efectiva por unidade de volume, corresponde à propriedade que genericamente se denomina densidade ou massa volúmica. Mas o peso específico da substância lenhosa é da ordem de 1,5, enquanto que a quase totalidade das madeiras apresenta valores de densidade significativamente mais baixos, facto que obviamente resulta da natureza celular do material e do enorme volume correspondente ao lúmen dos referidos elementos anatómicos.

Por outro lado, o material lenhoso é eminentemente higroscópico, o que significa que a comparação do valor da densidade de duas amostras de madeira só é válida quando expressa para um mesmo estado higrométrico ou teor de humidade. De facto, a quantidade de água líquida que a madeira pode pos-

suir está intimamente relacionada não só com a diversidade estrutural do material, mas também com o estado de humidade em que se encontra. Efectivamente a higroscopicidade característica afecta simultaneamente o peso e o volume da amostra de madeira, já que até à completa saturação das paredes celulares, a absorção de água determina um afastamento microfibrilar e, consequentemente, uma expansão das paredes e seu aumento de volume.

Assim, embora existam várias formas de expressar a densidade da madeira, aquela de mais generalizada utilização em tecnologia deste material é a densidade a 12 % de teor de humidade, ou seja $\rho_{12} = \frac{m_{12}}{v_{12}}$, universalmente denominada densidade padrão por corresponder à determinação feita à humidade consensualmente considerada como de referência $H = 12\%$. Acontece, inclusive, que mesmo quando a determinação das outras características físicas e mecânicas não pôde ser feita nas condições ideais, é possível reverter os valores àquela humidade padrão através de simples expressões experimentalmente comprovadas.

Portanto, a densidade é uma propriedade física da madeira, porventura a mais importante, pelas íntimas correlações efectivamente existentes com a maior parte das outras propriedades físicas, mas também com a grande maioria das propriedades mecânicas e tecnológicas.

Foi repetidamente dito que a madeira é caracteristicamente higroscópica, isto é, tende permanentemente a equilibrar o seu teor de humidade com o estado higrométrico e a temperatura do ambiente em que se encontra. Em verdade, a água é a componente indissociável da substância lenhosa, e por isso um dos estados em que nela se encontra é a água de constituição. Mas a íntima relação entre as duas substâncias verifica-se noutras formas: a água de saturação, retida pelas membranas higroscópicas das células, mas que é susceptível de mais ou menos intensa extracção a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ em câmara adequada de secagem (estufa); e a água livre, contida nos espaços celulares e intercelulares e cujas ligações com a substância lenhosa das paredes celulares são extremamente débeis. Por isso se liberta com muita facilidade sem provocar quaisquer perturbações à forma e dimensão das peças de madeira.

Obviamente apenas estas duas últimas formas em que a água pode ocorrer na madeira são importantes em termos de tecnologia e utilização do material: a água de saturação e a água livre, sendo sobretudo importante a presença da água de saturação (Figura 2.3).

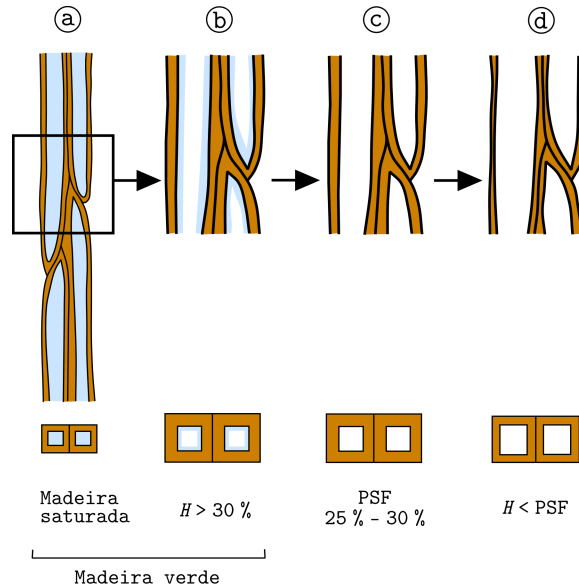


Figura 2.3 — Fases de secagem da madeira [2].

Portanto, o que em termos práticos efectivamente importa identificar como propriedade da madeira é a sua higroscopicidade e as consequências que a variação do teor de humidade do material têm nas suas outras propriedades e comportamentos.

Efectivamente, no momento do abate da árvore, a quantidade total de água que o material apresenta é extraordinariamente elevada, embora muito variável com as espécies e com a oportunidade da exploração. Nesse estado diz-se que a madeira está verde e o seu teor de humidade ou simplesmente a humidade da madeira é normalmente superior a 100 %, ou seja, a quantidade de água que possui num determinado volume é superior, expressa em peso, à quantidade de substância lenhosa que constitui as paredes do tecido celular da madeira. Assim, nesse estado, as paredes das células estão saturadas como os espaços celulares (lúmens) e intercelulares estão preenchidos por água livre, sendo o restante corresponde a fluidos gasosos (Figura 2.4). Ob-

viamente esta porção de água varia não só com a fracção do lenho da árvore analisado, ou seja, do seu ponto de amostragem: maior na periferia ou borne, do que no centro ou cerne; superior na base do fuste do que no cimo, junto à copa. Contudo o diferencial de humidade borne/cerne é relativamente pequeno nas folhosas, muitas vezes mais baixo na periferia do que no centro nas denominadas madeiras duras (carvalho), mas mais alto no borne do que no cerne das folhosas brandas (choupo), enquanto que nas resinosas, invariavelmente o teor de humidade do borne é sempre 2 ou 3 vezes superior ao do cerne. Consequentemente, por este facto, a humidade em verde das madeiras fornecidas por árvores ainda novas apresenta pequeno diferencial, enquanto que ele é pronunciado nas produzidas por árvores adultas. Por outro lado, admite-se a existência de pequenas variações sazonais do teor de humidade no lenho da mesma árvore, em regra maior no Inverno do que no Verão, apesar da sua relativamente pequena incidência técnica e fraco interesse prático.

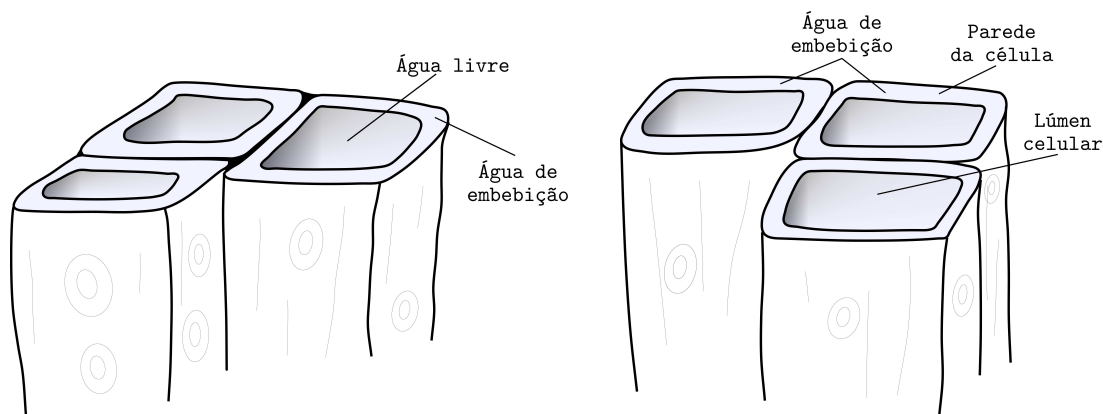


Figura 2.4 — Localização da água numa célula [1].

Partindo do estado verde, uma peça de madeira colocada ao ar vai gradualmente perdendo peso, ou seja perdendo água, secando, numa primeira fase sem perceptível variação de dimensão. Tal fase corresponde, portanto, apenas à evaporação da denominada água livre. Mas, a partir deste estado, acontece que a continuação do processo de secagem vai provocar a remoção de parte da água que satura as paredes celulares, água de saturação, fenómeno conjugado com a redução da espessura dessas paredes e, consequentemen-

te, das dimensões, sobretudo transversais (tangencial e radial) das células. Quando a humidade atingiu aquela fase em que toda a água livre foi retirada da estrutura celular e se inicia o processo de dessecação das paredes, diz-se que se atingiu o ponto de saturação das fibras (PSF), ou que a quantidade de água corresponde ao teor de saturação das fibras (TSF).

É um estado crucial, a partir do qual existem condições para a iniciação de fenómenos de retracção e, por via desta, em virtude da anisotropia característica do material, possíveis deformações e empenos.

A secagem do lenho continua até que se estabeleça um equilíbrio de teor de humidade entre a peça de madeira e as condições ambientais em que se encontra, ou seja, até que a madeira atinja a humidade de equilíbrio (Figura 2.5). Por exemplo, se a madeira estiver num compartimento a uma temperatura de 25 °C e 60 % de humidade relativa, a madeira terá um teor de humidade aproximado de 11 %.

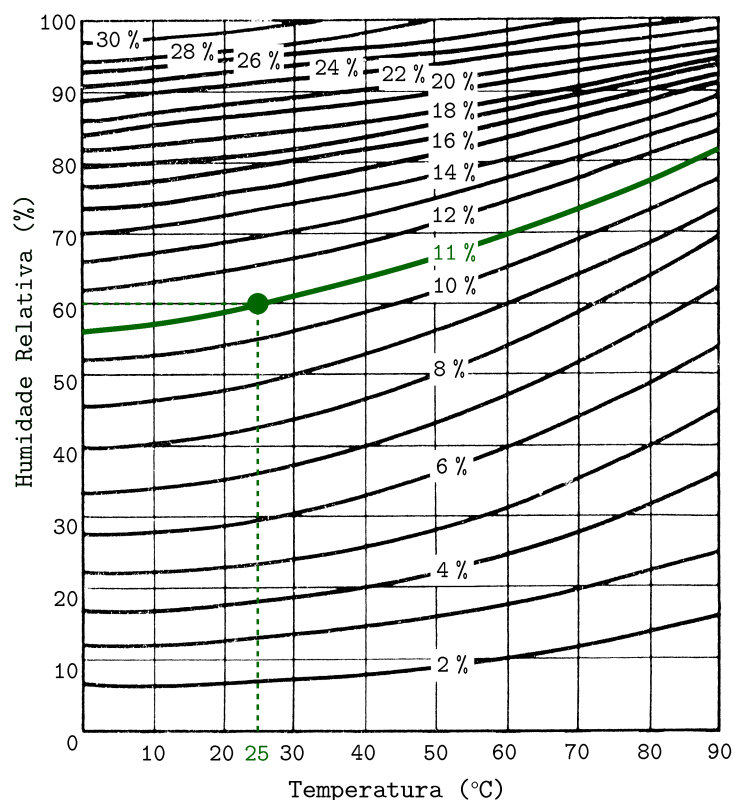


Figura 2.5 — Curvas da humidade de equilíbrio da madeira [5].

Obviamente tal estado não se verifica uniformemente em toda a massa da peça de madeira, mais rapidamente na película superficial em contacto com o ar envolvente, prosseguindo gradualmente, mas não uniformemente, da periferia para o centro. Desta forma, desenvolvem-se estados de tensão interna que podem conduzir a fenómenos de rotura entre porções da peça e segundo superfícies de fissuração.

Inversamente à secagem, pode ocorrer o fenómeno do entumescimento, isso é, um ganho de teor de humidade, cujas repercussões ou consequências são idênticas (mas não iguais) às da secagem, embora de sinal contrário. A madeira está permanentemente disposta a ceder e a absorver água, isto é, a fenómenos de adsorção e de desadsorção, mas as isotérmicas de sorção não são exactamente sobreponíveis, isto é, há uma histerese, como de resto acontece com muitos outros fenómenos físico-químicos (Figura 2.6).

O teor de humidade exprime-se em percentagem do peso da substância lenhosa que o provete ou amostra de madeira efectivamente contém. No Capítulo 4 apresentar-se-á a metodologia de avaliação.

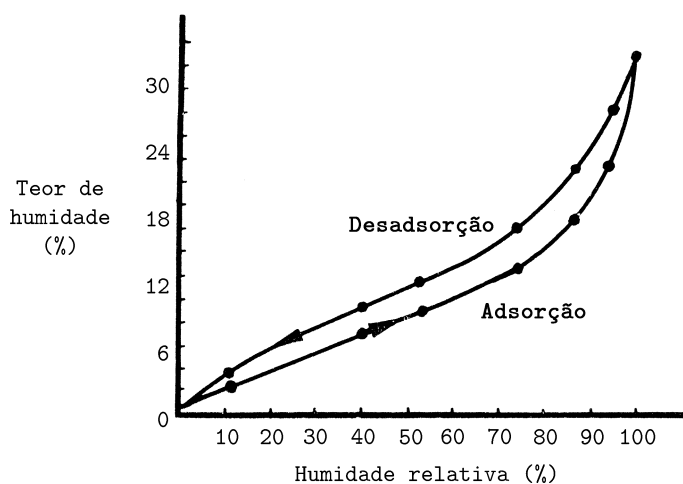


Figura 2.6 — Fenómeno de histerese [5].

As madeiras consideram-se comercialmente secas quando o seu teor de humidade está compreendido entre 18 % e 22 %; denominam-se secas ao ar quando a sua humidade é de 13 % a 17 %; e podem atingir valores inferiores quando

a dessecação progride mais ou menos intensamente em câmaras de secagem ou secadores, inadequadamente denominados estufas.

Finalmente, quando a amostra de madeira é colocada em estufa ventilada à temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, até um estado de invariabilidade do peso, diz-se que ela está completamente seca ou que atingiu 0 % de humidade.

É sabido que a variação do teor de humidade da madeira determina a variação das dimensões das peças. Este fenómeno que resulta da higroscopicidade da substância lenhosa (sua afinidade para a água) só se manifesta, como se viu, abaixo do teor de saturação das fibras (TSF); qualquer aumento do teor acima dele, resultante apenas do acréscimo da água livre, embora afecte a densidade, não tem repercussões volumétricas, compreendendo-se inclusive que, aumentando o teor de humidade acima do TSF, a variação da densidade não seja linear, mas exponencial, exactamente pela invariabilidade do volume. Inversamente, a perda de água abaixo do TSF repercute-se na dimensão das peças, fenómeno que se denomina retracção e que, pela anisotropia do material, tem maior expressão na direcção tangencial, seguindo-se na direcção radial, para não ter, em regra, significado na direcção axial. O quociente entre os valores das duas retracções transversais (tangencial e radial) denomina-se anisotropia de retracção, considerando-se que a madeira é tanto mais difícil de preparar e de tanto mais delicado desempenho funcional quanto maior é essa anisotropia (Figura 2.7).

A retracção da madeira constitui, pois, uma informação importantíssima para a sua caracterização e racional emprego. Não basta conhecer o valor global da variação do volume, que se denomina de retracção volumétrica, nem será suficiente conhecer o valor unitário dessa retracção quando a humidade da madeira varia 1 %, mas sim o valor unitário das retracções lineares, para as duas direcções em que a retracção tem maior expressão: tangencial e radial. Estes dados são facilmente calculados a partir dos resultados de testes consagrados de caracterização do material lenhoso que se apresentarão no Capítulo 4 e no Anexo A.

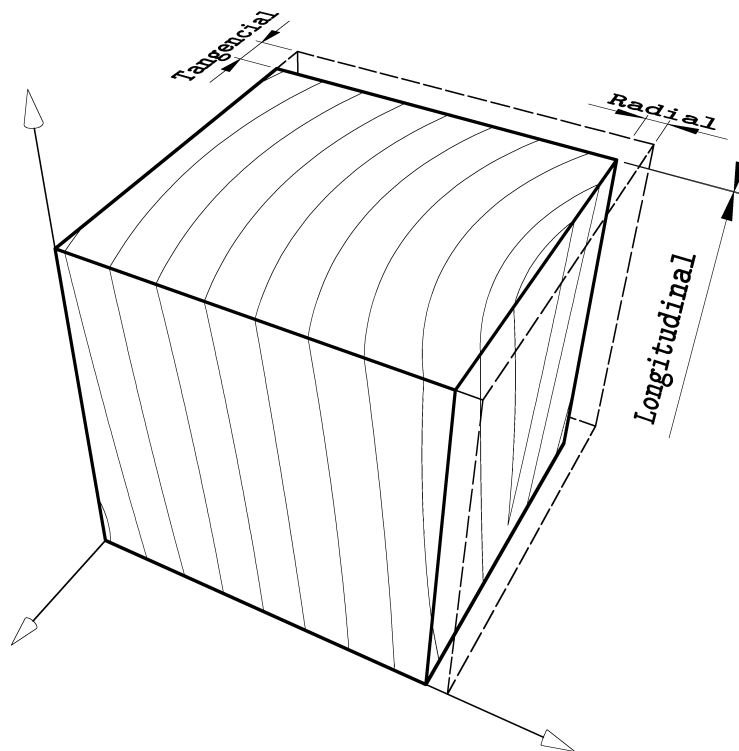


Figura 2.7 — Variação dimensional nas três direcções [1].

Frequentemente, nas fichas de caracterização, as retracções, lineares e volumétrica, são reportadas às variações dimensionais desde o estado verde ao estado completamente seco da madeira, e, por isso, se referem a valores totais de retracções: retracção volumétrica total; retracção tangencial total e retracção radial total, o mesmo acontecendo com os coeficientes de retracção.

Do que se disse acerca do dinamismo hídrico da madeira conclui-se que o bom desempenho do material em situação objectiva de aplicação depende da perfeita articulação entre o estado de humidade com que ela deve ser aplicada face às condições ambientais de emprego, ou seja do estado higrométrico e da temperatura do ar no espaço físico em que vai ser colocada. O rigor do emprego depende da harmonia que se conseguir entre a humidade de colocação da madeira e a humidade de equilíbrio que ela ao fim de um período mais ou menos longo vai atingir.

Resta referir que é costume adjectivar a madeira em função do valor do seu coeficiente de retracção volumétrica de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 — Classificação da madeira em função do seu coeficiente de re-tracção volumétrica α_v [5].

Classe	α_v (%)	Comportamento da madeira
Madeira muito nervosa	1,00 a 0,75	Madeira muito sensível a variações de humidade (alto dinamismo higroscópico) (faia; eucalipto)
Madeira nervosa	0,75 a 0,55	Madeira preferencialmente serrada radialmente (carvalhos duros, de rápido crescimento; robínia)
Madeira medianamente nervosa	0,55 a 0,35	Madeira de construção normal (pinho heterogéneo; castanho bravo)
Madeira pouco nervosa	0,35 a 0,15	Madeira de marcenaria, escultura e torneamento (nogueira; resinosas homogéneas; folhosas brancas; carvalho mole, de crescimento lento)

2.3.2 Teor de Humidade

O teor de humidade ou teor em água é uma propriedade que influencia, de uma maneira geral, as outras propriedades dos materiais porosos.

O teor de humidade é a relação entre a quantidade de água que o material possui nos seus poros e a massa do material no estado seco, expresso geralmente em percentagem, mas algumas referências também o indicam em quilogramas de água por quilogramas de material seco (kg/kg).

A determinação do teor de humidade pode ser conseguida por vários processos, sendo o mais simples e com resultados mais fiáveis, através da secagem do provete em estufa ventilada. Existem também muitos outros métodos, nomeadamente, o da resistividade eléctrica usado frequentemente em madeira dando valores aproximados do teor de humidade, ou indicando em alguns equipamentos, uma correlação com a densidade da madeira. É um método muito expedito e instantâneo de grande fiabilidade, podendo-se medir teores de humidade desde 7 % até 25 %, para um intervalo correspondente da resistividade eléctrica de 2200 M Ω /cm até 0,5 M Ω /cm.

Os resultados dos ensaios de caracterização da madeira, como de qualquer outro material, devem não apenas identificar a suas propriedades principais, mas também reconhecer as diversidades eventualmente existentes. Neste caso, para além da tal identificação, esses resultados deverão permitir a comparação das espécies entre si, inclusive a variabilidade que as condições de produção possam determinar.

É então necessário que os ensaios sejam feitos em condições tão semelhantes quanto possível. Daí que se tenham aprovado normas de ensaio impondo não só as dimensões dos provetes, mas também as regras quanto à sua preparação, execução e condicionamento, bem como a metodologia da execução para avaliação das características ou propriedades reconhecidas absolutamente indispensáveis à qualificação comparativa absoluta da madeira.

Assim, as normas de ensaio prescrevem o seguinte:

- a) Os provetes devem ser isentos de defeitos (nós, fendas, desvios do fio, anomalias estruturais, etc.);
- b) devem ser cuidadosamente orientados da mesma maneira, isto é, de formato paralelepípedo, de faces correspondentes aos três planos fundamentais: radial, tangencial e transversal, para que as forças e/ou medições sejam sempre aplicadas ou realizadas em faces homólogas;
- c) devem possuir o mesmo teor de humidade (padronizadamente estabelecido em 12 %);
- d) finalmente, os ensaios devem ser realizados nas mesmas condições de temperatura, da ordem dos 20 °C.

Consensualmente estabeleceu-se que o teor de humidade de referência da madeira é de 12 %.

O estado de humidade da madeira denominado teor de saturação das fibras (TSF) constitui, um ponto crucial do seu comportamento físico e mecânico. Situando-se, em regra, próximo dos 30 %, acontece, porém, haver espécies em que é bastante mais baixo, 18 % a 20 % apenas, enquanto que noutras madeiras ultrapassa aquele valor, situando-se entre 35 % e 40 %.

As madeiras das regiões temperadas têm, geralmente, valores de TSF normais ($\approx 30\%$), com frequência bastante díspares do TSF das madeiras tropicais. Acontece então que as madeiras de baixo TSF estabilizam a humidades de equilíbrio relativamente altas, pelo que são mais apropriadamente utilizadas em regiões húmidas. Em situações em que a humidade de equilíbrio seja baixa, tendem a deformar-se consideravelmente e, por isso, são nervosas⁴. Pelo contrário, nas madeiras com elevado TSF, que, na generalidade dos casos são utilizadas em situações em que a humidade de equilíbrio é muito inferior, tendem a retrair ou expandir com as variações de humidade, mas são, em geral, pouco nervosas⁵.

Na Tabela 2.3, enumeram-se algumas normas de determinação do teor de humidade de diferentes materiais de construção.

Tabela 2.3 — Normas para determinação do teor de humidade.

Ref. ^a	Material	Título
NP EN 322:2002	Placas de derivados de madeira	Determinação do teor de água
ISO 3130:1975	Madeira	<i>Determination of moisture content for physical and mechanical tests</i>
NP-614:1973	Madeiras	Determinação do teor em água

Nas diferentes normas, o processo de secagem e de medição é semelhante, variando apenas o critério de paragem, a nomenclatura, e em alguns casos, a denominação e a determinação podem ser diferentes consoante as características físicas dos materiais.

De uma maneira geral, os aparelhos e utensílios necessários são os seguintes:

- Balança;
- Estufa;
- Exsicador;

⁴ A madeira considera-se nervosa quando: $0,75\% < \alpha_v < 0,55\%$.

⁵ A madeira considera-se pouco nervosa quando: $0,35\% < \alpha_v < 0,15\%$.

- Recipiente para conter o provete;
- Cápsula.

2.3.2.1 Determinação do Teor de Humidade de Placas de Derivados de Madeira

Segundo a [7], determina-se por pesagem, a perda de massa dum provete entre o seu estado no momento em que foi retirado e o seu estado após secagem até massa constante a (103 ± 2) °C e cálculo desta perda de massa em percentagem da massa do provete após secagem.

As dimensões do provete não têm importância, devendo o provete ter uma massa mínima inicial de 20 g e não devendo ter partículas soltas.

Determina-se o teor de humidade, H , de cada provete, em percentagem mássica, ao 0,1 % mais próximo, de acordo com a expressão:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100$$

em que:

- m_H — massa inicial do provete, expressa em gramas;
- m_0 — massa do provete após secagem, expressa em gramas.

O teor de humidade duma placa é obtido pelo cálculo da média aritmética do teor de humidade de todos os provetes provenientes da mesma placa.

2.3.2.2 Determinação do Teor de Humidade da Madeira

Segundo [8], determina-se por pesagem, a perda de massa dum provete após secagem a (103 ± 2) °C até massa constante, isto é, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas intervaladas de 6 h é inferior a 0,5 % da massa do provete. Calcula-se a perda de massa em percentagem da massa do provete após secagem.

O provete deve ter preferencialmente uma forma prismática, de secção quadrada com 20 mm de lado e altura ao longo dos veios da madeira de (25 ± 5) mm.

O teor de humidade, H , de cada provete, em percentagem mássica, deve ser calculado com uma precisão de 1 % através da expressão:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

em que:

m_1 — massa inicial do provete, expressa em gramas;

m_2 — massa do provete após secagem, expressa em gramas.

Se for necessário determinar o teor de humidade com uma precisão de 0,1 % usando cápsulas, deve ser usada a seguinte expressão:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100$$

em que:

m_0 — massa da cápsula, expressa em gramas;

m_1 — massa inicial do provete, expressa em gramas;

m_2 — massa do provete após secagem, expressa em gramas.

A norma [9] descreve um processo muito semelhante ao descrito em [8], variando as dimensões mínimas e o critério de paragem. A secção do provete de madeira deve ser quadrada com 20 mm de aresta e altura de 60 mm na direcção axial. O critério de paragem é definido como a diferença entre duas pesagens consecutivas intervaladas de 2 h e que deve ser inferior a 0,5 % da massa do provete. Altera-se também a nomenclatura do teor de humidade que se representa por H , em normas portuguesas e por u , em normas europeias e internacionais.

Embora referências estrangeiras tenham previsto a utilização de provetes de três tipos de secções (50 mm × 50 mm, 25 mm × 25 mm e 20 mm × 20 mm), a dimensão preconizada nas Normas Portuguesas é de 20 mm × 20 mm para a generalidade dos ensaios, excepto para o ensaio de corte, em virtude da complexidade na realização do teste com provetes de pequeno tamanho.

No presente estudo, uma vez que não se pretendia uma análise exaustiva das propriedades físicas e mecânicas da madeira, optou-se pelas dimensões dos provetes indicadas em [10].

2.3.3 Higroscopicidade – Curvas Higroscópicas

Os materiais de construção porosos, expostos a determinada temperatura e humidade relativa, irão atingir, ao fim de algum tempo, um estado de equilíbrio com o ambiente. Os materiais porosos trocam vapor de água com o ar ambiente até atingirem o ponto de equilíbrio.

O teor de humidade higroscópico máximo de qualquer material poroso é significativamente menor do que o teor de humidade máximo que qualquer material pode adquirir por adsorção (Figura 2.8). Por exemplo, o teor de humidade higroscópico máximo u_h , no tijolo de barro vermelho é cerca de 1 %, mas o teor de humidade máximo $u_{máx}$ é da ordem de 13 %.

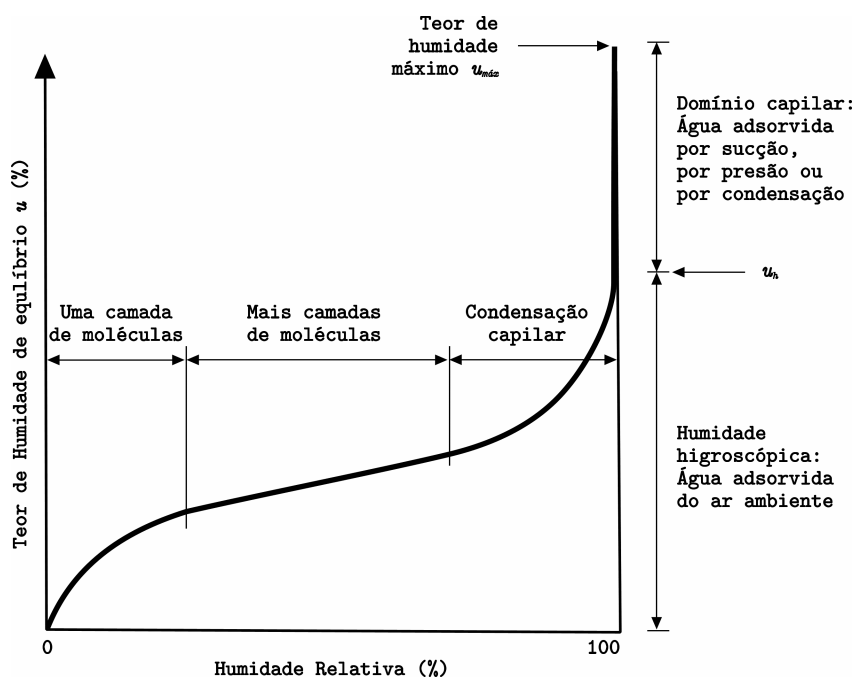


Figura 2.8 — Curva higroscópica típica a temperatura constante [11].

A higroscopicidade representa a capacidade dos materiais adsorverem e restituírem vapor de água existente no ambiente. Os materiais podem conter água nos seus poros, em diferentes quantidades para diferentes situações de temperatura e humidade ambientes. Assim, é possível definir o valores do teor de humidade de equilíbrio do material para diferentes condições de hu-

midade e para uma temperatura constante, isto é, isotérmicas de sorção⁶ a que chamamos simplesmente curvas higroscópicas.

A relação entre o teor de humidade de equilíbrio e a humidade relativa denomina-se curva higroscópica e muitos materiais estão já catalogados em manuais da especialidade. Uma vez que a sua determinação é realizada para certos valores discretos da humidade relativa, é necessário fazer-se ajustes de curvas de aproximação descritos no parágrafo 2.3.3.2.

2.3.3.1 Determinação da Curva Higroscópica

Existem dois métodos descritos em [12] para determinação da curva higroscópica de materiais e produtos de construção. Um através da utilização de exsicadores e outro através de câmara climática. Em ambos os métodos, o processo de cálculo é semelhante.

O equipamento necessário é o seguinte:

- Recipientes que não absorvam água e com tampa estanque;
- Balança, com uma resolução de $\pm 0,01$ % da massa do provete;
- Estufa ventilada.

Os provetes devem ter uma massa superior a 10 g e aqueles cuja densidade seja inferior a 300 kg/m^3 deverão ter uma área mínima de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$.

Em ambos os métodos podem determinar-se as curvas de adsorção e de desadsorção. O processo é basicamente determinar o teor de humidade segundo um dos processos descritos no parágrafo 2.3.2 — Teor de Humidade, para diferentes valores da humidade relativa a que o material estará submetido.

Segundo [12], será necessário um mínimo de quatro valores da humidade relativa igualmente espaçados e escolhidos no intervalo de 30 % a 95 %.

2.3.3.2 Métodos de Ajuste a Curvas Higroscópicas

A relação entre o teor de humidade e a humidade relativa num estado de equilíbrio a uma temperatura constante é designada, como se disse antes, curva higroscópica (isotérmica de sorção ou simplesmente isotérmica).

⁶ Do inglês *sorption isotherms*.

Ao longo dos anos foram determinadas curvas higroscópicas para diferentes gases que foram adsorvidos por diversos materiais. *Brunauer, Emmet e Teller* [11], agruparam as curvas higroscópicas em cinco classes diferentes como se pode observar na Figura 2.9. Os tipos I e II são os mais comuns. A fixação da humidade em materiais de construção porosos dá origem a curvas em forma de S, do tipo II.

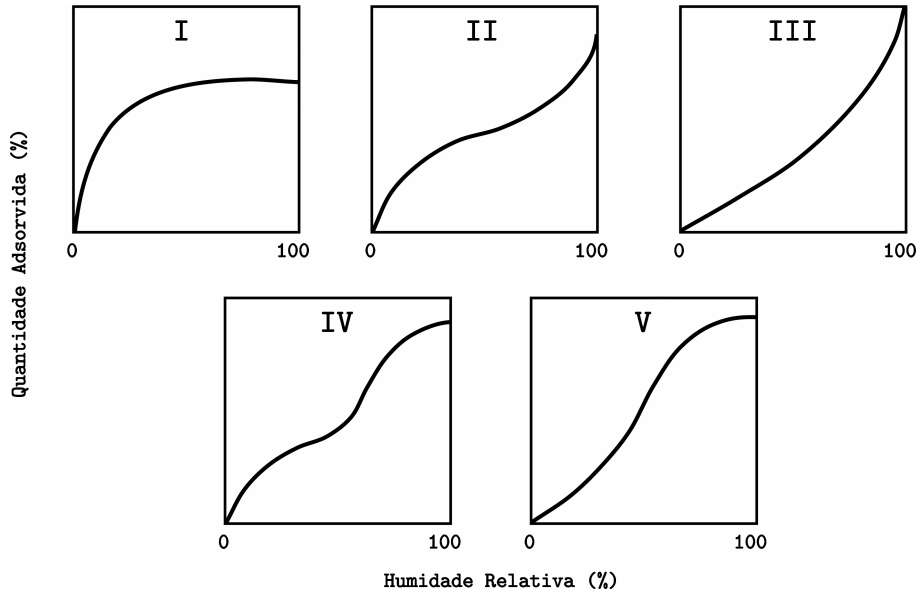


Figura 2.9 — Tipos diferentes de curvas higroscópicas [11].

Têm sido avançadas muitas teorias acerca do cálculo da absorção de gases pelos sólidos. As teorias mais bem conhecidas são as curvas higroscópicas de *Langmuir* e a *BET*. Os modelos são úteis para ajustar curvas higroscópicas aos valores de adsorção resultantes de ensaios experimentais, com o auxílio de um programa de computador.

Langmuir assume que a adsorção se dá numa única camada molecular, apresentando, a curva higroscópica, a forma do tipo I da Figura 2.9, e que segue a expressão seguinte:

$$u = \frac{a b \phi}{1 + b \phi}$$

em que a é o teor de humidade absorvendo uma monocamada completa, b é um coeficiente proporcional à temperatura e ϕ é a humidade relativa.

A teoria *BET*, baseada na teoria de *Langmuir*, estipula que a curva higroscópica de adsorção multimolecular pode ser composta por uma série de curvas higroscópicas simultâneas baseadas na teoria de monocamada de *Langmuir*, apresentando-se segundo a expressão:

$$u = \frac{a b \phi [1 - (n+1)\phi^n + n\phi^{n+1}]}{(1-\phi)[1 + (b-1)\phi - b\phi^{n+1}]}.$$

Para $n = \infty$, a equação transforma-se em:

$$u = \frac{a b \phi}{(1-\phi)[1 + (b-1)\phi]}.$$

Para $n = 1$, é encontrada a curva e *Langmuir*. A curva *BET* pode ser usada para descrever a parte inferior da curva higroscópica até cerca de 40 %.

A equação de *Posnow* dá a melhor aproximação para o intervalo de 30 % a 100 % de humidade relativa. A expressão é derivada de experiências com madeira:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{u_h} - B \ln \phi$$

onde u_h é o teor de humidade higroscópico máximo e B um factor dependente da temperatura. A equação anterior pode ser reescrita na forma:

$$u = u_h \left(1 - \frac{\ln \phi}{d}\right)^{-1} \text{ com } d = \frac{1}{u_h B}$$

No trabalho de *Kurt Hansen*, foi usada a equação empírica de *Freiesleben Hansen* para as curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção desenvolvida para o betão endurecido. Depois de reorganizada, a equação transforma-se em:

$$u = u_h \left(1 - \frac{\ln \phi}{A}\right)^{-\frac{1}{n}} = u_h \exp \left[-\frac{1}{n} \ln \left(1 - \frac{\ln \phi}{A}\right) \right]$$

em que u_h é o teor de humidade higroscópico máximo, n é um expoente empírico e A pode ser determinado experimentalmente. A introdução do coeficiente n torna a equação aplicável para descrever tanto a adsorção como a desadsorção para a maioria dos materiais no intervalo de 20 % a 98 % de humidade relativa.

Na Figura 2.10 pode observar-se um esquema de uma curva higroscópica de um material de construção. O equilíbrio atingido durante a secagem produz uma curva de desadsorção e o equilíbrio atingido durante a humedificação produz uma curva de adsorção. O desvio entre as duas curvas é a histerese. A curva de desadsorção surge sempre acima da de adsorção a uma mesma temperatura.

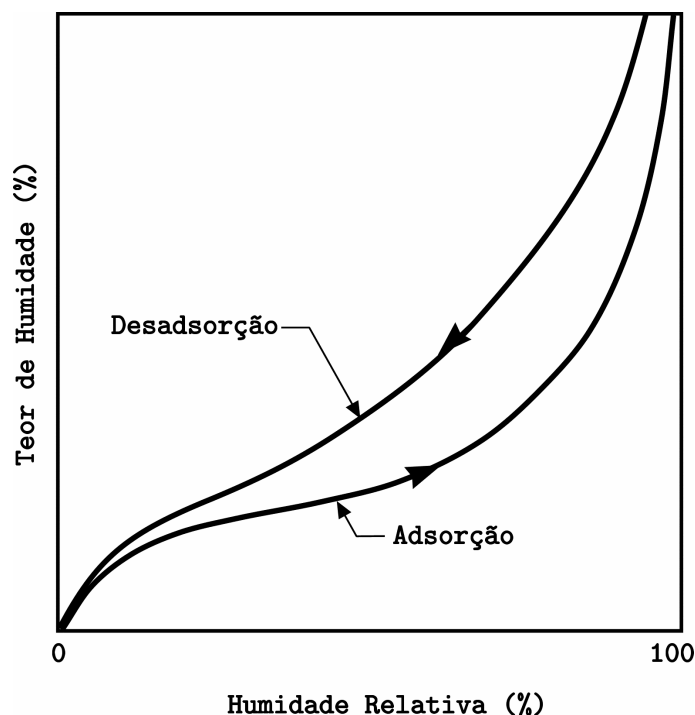


Figura 2.10 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção e respectiva histerese [11].

O teor de humidade de equilíbrio num material é dependente não só da humidade relativa do ar ambiente, mas também da temperatura do ar. A posição e a forma da curva higroscópica são influenciadas pela temperatura. A temperaturas elevadas, correspondente a um nível de energia elevado, causa uma mais fácil libertação das moléculas de água. Por esta razão as curvas higroscópicas a temperaturas mais altas surgem por baixo das curvas higroscópicas a temperaturas mais baixas.

Como referido anteriormente, a fixação de água nos materiais de construção porosos origina uma curva higroscópica em forma de S do tipo II (Figura

2.9). Com a utilização da mesma equação para caracterização de todos os materiais, tanto para a adsorção como para a desadsorção no intervalo de 20 % a 98 % de humidade relativa, a forma em S pode tornar-se omissa em alguns casos. A equação não permite traduzir o intervalo de 0 % a 20 % de humidade relativa, pelo que a aproximação pode afastar-se dos valores medidos nas humidades relativas altas ao querermos aproximar também os pontos com humidade relativas mais baixas.

Muitas outras equações podem ser encontradas na bibliografia no que se refere a curvas higroscópicas de alimentos, que também se poderão adaptar em alguns casos a materiais de construção, como é o caso dos modelos *GAB*, *Halsey*, *Oswin*, *Smith* e *Peleg*. O modelo *GAB* é muito semelhante ao modelo *BET*, mas com mais um coeficiente k extra. O modelo *BET* é um caso especial do modelo *GAB* com $k = 1$.

Para encontrar os coeficientes das equações apresentadas, os dados experimentais têm que ser submetidos a uma análise de regressão não linear, utilizando aplicativos de cálculo estatístico ou uma simples folha de cálculo dotada de um *plug-in*⁷ adequado.

Os critérios que se podem usar para avaliar o melhor ajuste obtido com as diferentes equações são, por exemplo, o coeficiente de correlação ao quadrado R^2 e o módulo de desvio relativo médio E .

$$E = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f(\phi_i) - u_i|}{u_i}$$

em que u_i são os teores de humidade experimentais, $f(\phi_i)$ os valores obtidos da regressão e n o número de dados experimentais.

2.3.3.3 Curvas Higroscópicas de Vários Materiais de Construção

Apresentam-se nas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7, a título de exemplo, as curvas higroscópicas de adsorção e de desadsorção de vários materiais de construção.

As curvas foram ajustadas com a expressão de *Freiesleben Hansen* aos resultados experimentais de *Kurt Hansen*.

⁷ Suplemento que se pode adicionar à folha de cálculo com capacidade de resolução de problemas estatísticos não lineares.

Podem verificar-se que os materiais tornam-se menos higroscópicos, isto é, absorvem menos água à medida que se tornam mais densos.

Chama-se particular atenção para o comportamento do gesso, cuja adsorção se inicia apenas a partir de 70 % de humidade relativa e tem um percurso muito semelhante ao da curva de desadsorção, isto é, apresenta uma histerese bastante reduzida.

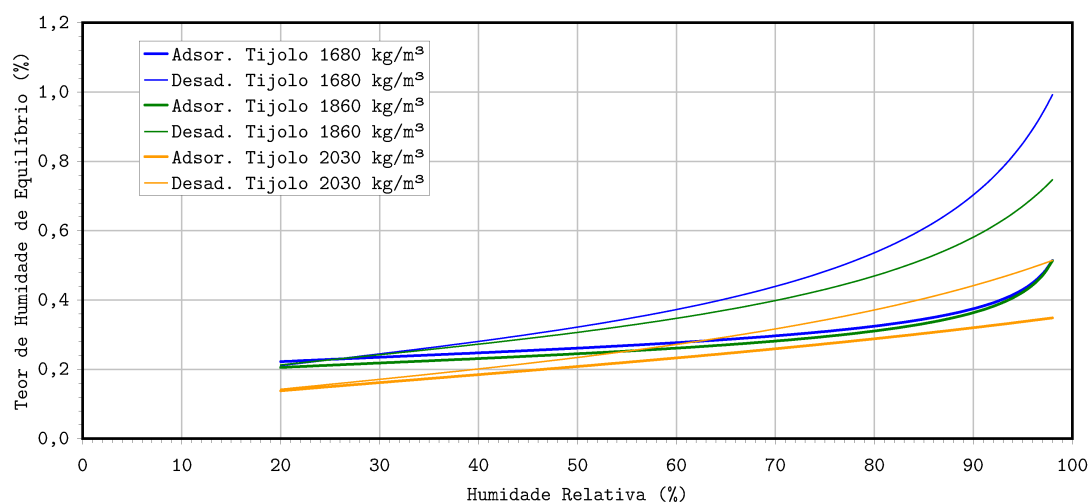


Figura 2.11 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção de tijolos de barro vermelho de diferentes massas volúmicas [11].

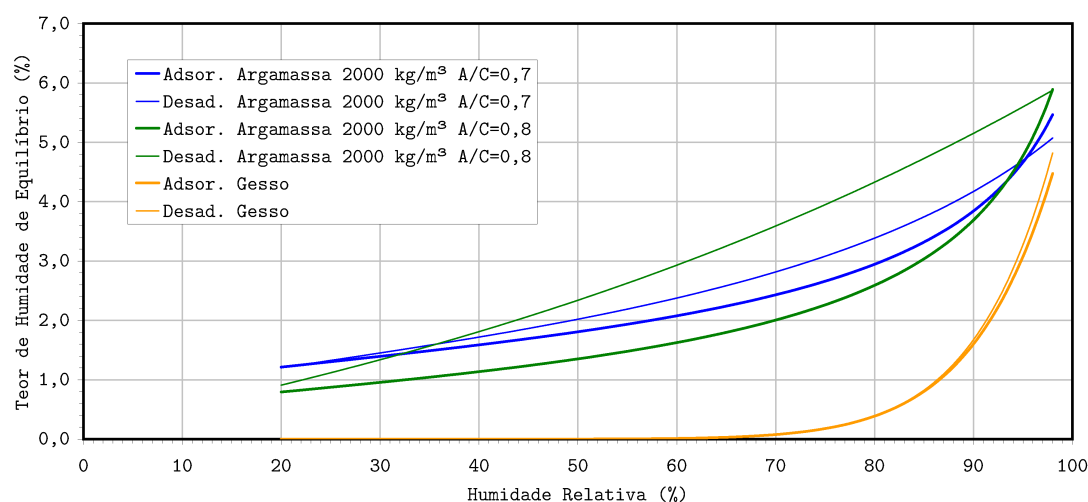


Figura 2.12 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção do gesso e da argamassa de cimento com diversas relações A/C [11].

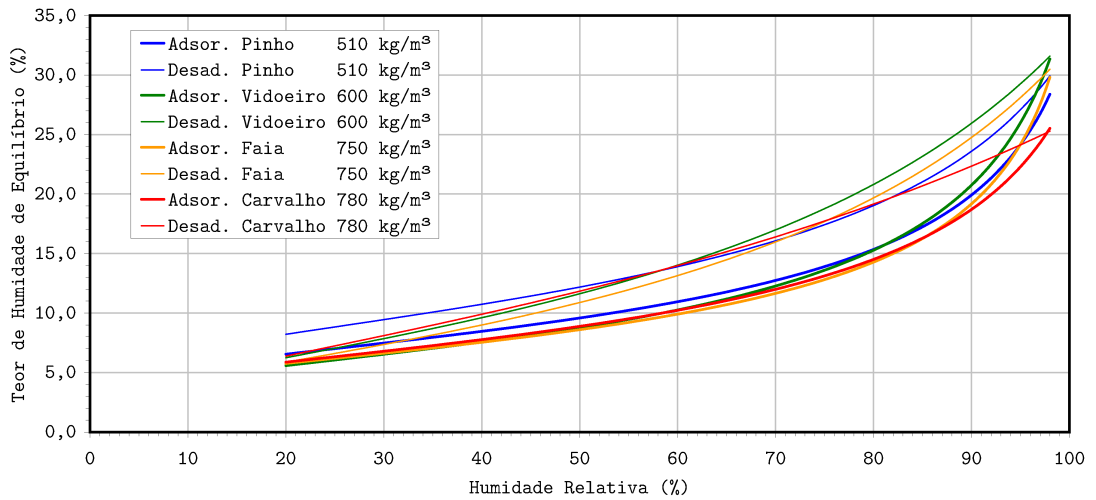


Figura 2.13 — Curvas higroscópicas de adsorção e desadsorção de diversas espécies de madeira [11].

2.3.3.4 Curva Higroscópica da Madeira

O teor de humidade de equilíbrio é o valor estabilizado do teor de humidade da madeira face às condições ambientes do local de aplicação. Apesar da temperatura e da humidade relativa do ar ambiente serem os factores principais de controlo do teor de humidade de equilíbrio, é também afectado pela espécie de madeira, pela massa volúmica, etc.

Na indústria de produtos florestais, a curva higroscópica da madeira está generalizada e foi apresentada pela primeira vez na edição de 1955 do *Wood Handbook* (US FPL). No entanto, os valores⁸ publicados tinham algumas imperfeições, mas eram os únicos dados disponíveis, tendo sido usados com algum sucesso durante muitos anos. *Simpson* (1973) utilizando os dados constantes no *Wood Handbook* aproximou uma curva para o intervalo de 30 °F (-1,11 °C) até 210 °F (98,89 °C) servindo-se do modelo de *Hailwood-Horrobin* apresentado de seguida [13], [14] e [15]:

$$H_{equi} = \frac{1800}{M_p} \left(\frac{k h}{1 - k h} + \frac{k_1 k h + 2 k_1 k_2 k^2 h^2}{1 + k_1 k h + k_1 k_2 k^2 h^2} \right)$$

⁸ Dados obtidos do abeto durante a fase de desadsorção desde as condições de madeira verde.

em que H_{equi} é o teor de humidade de equilíbrio, h a humidade relativa e M_p , k , k_1 e k_2 são constantes. As equações que relacionam as constantes com a temperatura em graus *Celsius* são as seguintes:

$$M_p = 349 + 1,292 t + 0,0134 t^2$$

$$k = 0,805 + 0,000736 t - 0,00000273 t^2$$

$$k_1 = 6,27 - 0,00938 t - 0,000303 t^2$$

$$k_2 = 1,91 + 0,0407 t - 0,000293 t^2$$

O teor de humidade de equilíbrio da madeira foi calculado através do modelo apresentado para várias temperaturas podendo observar-se o seu comportamento no gráfico da Figura 2.14.

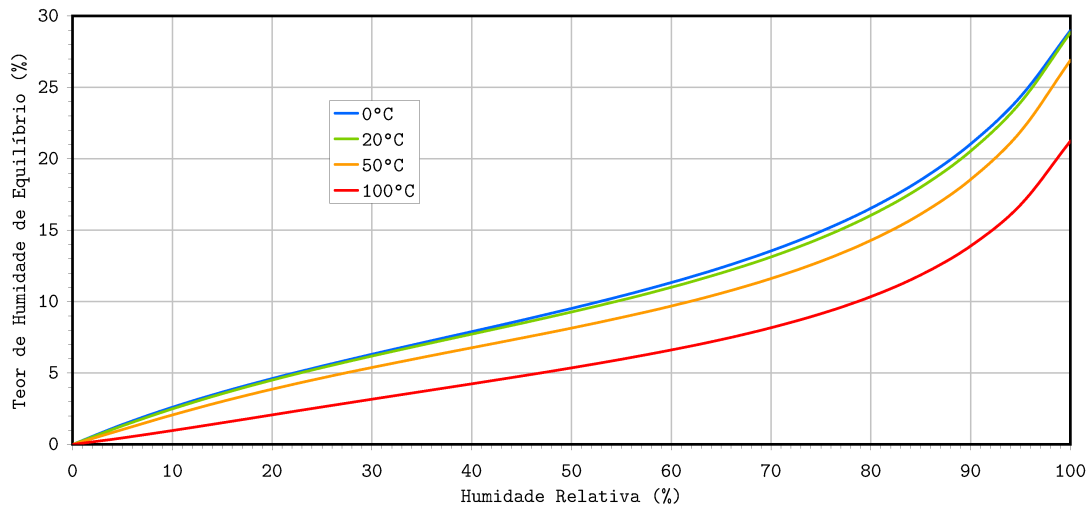


Figura 2.14 — Curvas higroscópicas da madeira a diferentes temperaturas.

2.3.4 Secagem

A secagem constitui uma importantíssima operação de preparação da madeira transformada.

Como se disse, a higroscopicidade é uma das propriedades mais características da substância lenhosa. Para além da água fazer parte intrínseca da sua constituição, existe uma permanente disponibilidade de estabilização do teor de humidade da madeira, fenómeno que se denomina por sorção, na busca de um constante equilíbrio da humidade do material com as condições microclimáticas do ambiente que o rodeia.

As relações entre a água e a madeira são complexas e os problemas e forças envolvidas dificilmente delimitadas e discerníveis. Traduzem-se num permanente jogo de fenómenos de adsorção e de desadsorção, cuja intensidade é determinada, pelo menos em parte, pela superfície exposta à sorção, pela pressão relativa do vapor, pela temperatura e pela composição química do material. É possível, inclusive, identificar dois grandes grupos de fenómenos de sorção: de natureza predominantemente química (sorção química) e de natureza predominantemente física (adsorção superficial e condensação capilar).

A água circula na madeira pelos capilares dos mais variados calibres que nela existem: os lúmens, os canalículos das membranas das pontuações, os espaços intercelulares e intracelulares ou microcapilares transitórios das membranas celulares. Em consequência, as tensões que neles se desenvolvem são desiguais, determinando níveis de circulação diferentes. Assim, nos lúmens celulares, a água livre circula por capilaridade, na forma líquida ou de vapor, mais dificilmente nos canalículos das membranas das pontuações, como acontece no lenho das Resinosas. No lenho das Folhosas, a abundância das perfurações facilita a circulação.

Em relação à água de embebição, a dimensão dos capilares transitórios determina a condensação do vapor e, à medida que a água livre se vai escoando dos lúmens, a água das paredes das células evapora-se para esses espaços onde passa a circular por difusão sob gradientes de pressão de vapor.

Em síntese, todo o movimento da água, de outros líquidos e gases na madeira envolve a permeabilidade das suas estruturas microscópica e submicroscópica:

- Acima do teor de saturação das fibras (TSF), os maiores capilares contêm água líquida e as moléculas de água adjacentes às paredes dos capilares estão ligadas por sorção química.
- Acima dos 15 %, teor que pode ser considerado limite da absorção superficial, e até ao TSF, a água da parede celular é fixada por condensação capilar.

- Mas o movimento da água acontece não apenas na forma líquida, mas também na de vapor. De facto, o movimento do vapor de água é possível, tanto acima como abaixo do TSF, devido a gradientes relativos da pressão do vapor, também de acordo com a lei da difusão.

Ora a caracterização da madeira em termos da sua capacidade de secagem vem sendo desenvolvida segundo duas vertentes fundamentais: de um lado, pelo conhecimento cada vez mais íntimo das leis que presidem à circulação dos fluxos líquidos e gasosos na estrutura lenhosa, isto é, das teorias da mecânica dos fluídos; de outro lado, pelo desenvolvimento de metodologias de análise e medição da intensidade dos fenómenos envolvidos e das suas consequências na eventual formação de tensões fragilizadoras da coesão do material.

Finalmente, os progressos conseguidos nas técnicas de controlo da informação e da regulação dos sistemas de comando dos equipamentos de secagem, vieram aumentar a segurança da preparação, por mais ajustado estabelecimento dos programas de secagem às singularidades da madeira e à evolução da dessecação.

2.3.5 Relação entre a Massa Volúmica e o Teor de Humidade

Nas secções anteriores foi possível comparar a variação das curvas higroscópicas com a massa volúmica dos diversos materiais de construção. A massa volúmica está relacionada com a estrutura porosa do material pelo que consideramos importante incluir os métodos para a sua determinação.

2.3.5.1 Determinação da Massa Volúmica da Madeira

Na determinação da massa volúmica de materiais de construção são necessários alguns instrumentos, dentre os quais, os seguintes:

- Micrómetro ou um instrumento de medição similar com resolução até ao 0,01 mm;
- Paquímetro ou qualquer outro instrumento e que permita uma leitura ao 0,1 mm;

- Balança que permita uma medição ao 0,01 g.

Da bibliografia consultada, podem-se destacar as seguintes referências relativas à determinação da massa volúmica:

- NP EN 323:2002. Placas de derivados de madeira. Determinação da massa volúmica;
- ISO 9427:2003. *Wood-based panels. Determination of density*;
- NP 616:1973. Madeiras. Determinação da massa volúmica.

2.3.5.2 Placas de Derivados de Madeira

A determinação da massa volúmica de provetes de uma placa de derivados de madeira, segundo [16], corresponde à razão da massa pelo volume de cada provete, ambos medidos com o mesmo teor de humidade e utilizando estes resultados para estimar a massa volúmica de placas inteiras. A massa volúmica ρ , de cada provete, em kg/m^3 , é calculada pela expressão:

$$\rho = \frac{m}{b_1 b_2 t} \times 10^6$$

em que:

- m — massa do provete, expressa em gramas;
- b_1 — largura do provete, expressa em milímetros;
- b_2 — comprimento do provete, expresso em milímetros;
- t — espessura do provete, expressa em milímetros.

A massa volúmica duma placa é obtida pelo cálculo da média aritmética da massa volúmica dos provetes providos da mesma placa e expressa em kg/m^3 arredondado à unidade.

2.3.5.3 Madeira Maciça

De acordo com as normas de caracterização da madeira, a massa volúmica a determinado teor de humidade (H %) de um provete é o quociente da massa do provete pelo seu volume, ambos determinados com um teor de humidade H %. Consequentemente, $\rho_H = \frac{m_H}{V_H}$ em que m_H é a massa do provete, expressa em gramas e V_H o volume do provete, expresso em centímetros cúbicos.

A massa volúmica de referência é determinada ou reportada ao teor de humidade de referência ($H = 12 \%$).

Em termos de aplicação prática, o conhecimento da massa volúmica da madeira a determinado teor de humidade possibilita a avaliação aproximada da densidade correspondente a qualquer outro teor de humidade com recurso ao denominado ábaco de *Kollmann* construído pelo cientista alemão a partir de vasta informação sobre a variação da retracção volumétrica e do teor de saturação de fibras de grande número de amostras e de muitas diversas espécies de madeiras (Figura 2.15).

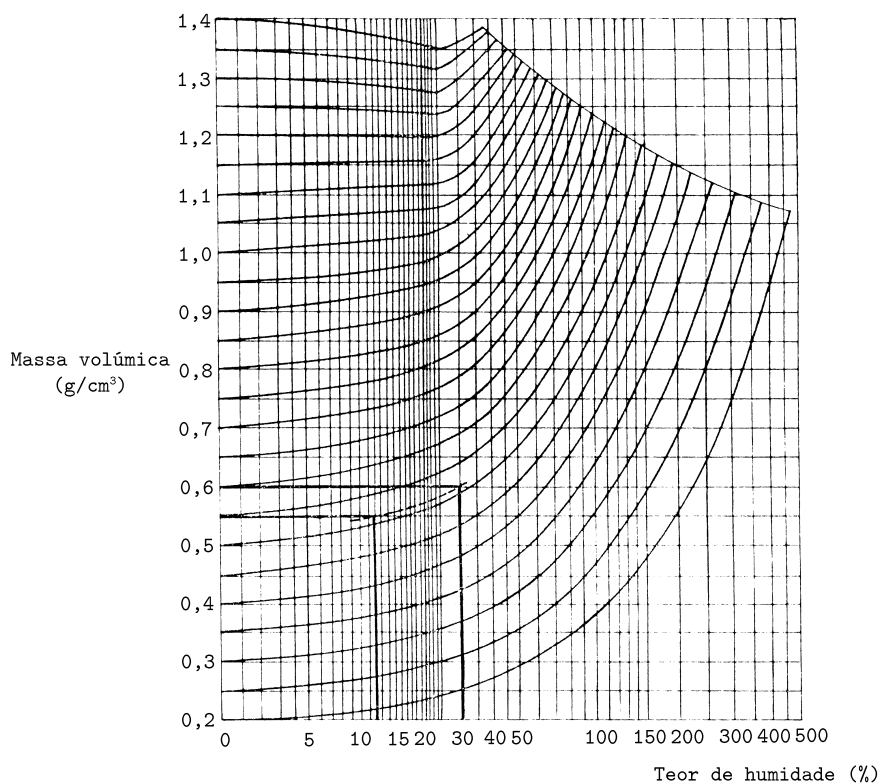


Figura 2.15 — Ábaco de *Kollmann* [5] e [17].

A utilização deste ábaco é simples: se uma amostra de madeira tiver, a 30 % de teor de humidade, a massa volúmica de 0,6 g/cm³, corresponder-lhe-á, a $H = 12 \%$, a densidade de 0,55 g/cm³.

Este ábaco permite em particular, conhecendo a massa volúmica de uma amostra a 12 % de humidade, calcular a sua densidade para outros estados de humidade abaixo do teor de saturação das fibras. Demonstra-se que a massa

volúmica é aproximadamente igual a $\rho = \frac{(1-\alpha_v)\rho_H}{100}$. Do mesmo modo, a partir da massa volúmica a H %, também inferior ao teor de saturação das fibras, é possível calcular o seu valor a 12 %: $\rho_{12} = \rho_H \left[1 - \frac{(1-\alpha_v)(H-12)}{100} \right]$. Uma expressão mais abrangente pode permitir calcular a massa volúmica de referência independentemente da humidade: $\rho_{12} = \rho_H \frac{(100+12)(100+\alpha_v H')}{(100+H)(100+12\alpha_v)}$ em que H' toma o valor de H ou de S conforme o teor de humidade é inferior ou não ao teor de saturação das fibras.

A massa volúmica é um critério muito importante da avaliação da capacidade de utilização da madeira. Há, com efeito, uma correlação positiva bastante consistente entre densidade e resistência mecânica: as madeiras mais pesadas são, em geral, mais resistentes; por outro lado, para idêntica resistência, preferem-se as madeiras mais leves.

Mas a massa volúmica não é constante na mesma espécie e, em particular para as madeiras das regiões temperadas, a análise prévia da massa volúmica constitui informação muito importante para a sua racional utilização.

2.3.6 Retracção

2.3.6.1 Retracção da Madeira

A perda de água, por secagem, abaixo do teor de saturação das fibras, determina, como se sabe, a retracção das paredes celulares e, conseqüentemente, a redução das dimensões de um provete de madeira.

Define-se por retracção linear o quociente, expresso em percentagem, da variação do comprimento de um segmento tomado sobre o provete. Assim, segundo as três direcções fundamentais, considera-se a retracção axial, a retracção radial e a retracção tangencial. A retracção linear é total quando a variação dimensional resulta desde o estado de saturação das fibras até ao estado de completamente seco.

Assim também a retracção volumétrica de um provete é o quociente, expresso em percentagem, da variação do seu volume devida a perda de humidade, e considera-se retracção volumétrica total a retracção volumétrica cor-

respondente à diminuição da humidade desde o teor de humidade de saturação das fibras até 0 %.

Finalmente, denomina-se coeficiente de retracção volumétrica e coeficiente de retracção linear (axial, tangencial e radial) a variação dimensional correspondente à diminuição de 1 % da humidade do material, avaliável, como se compreende, para valores de H % abaixo do teor de saturação das fibras, uma vez que, acima dele, não há variação dimensional com perda de humidade.

Uma representação gráfica destas noções permitirá compreender o significado exacto dos dois valores ε_v e α_v e a sua conjugação com o teor de saturação das fibras.

Num sistema de coordenadas rectangulares (Figura 2.16), traçam-se as curvas respectivas da variação de dimensões do provete segundo cada direcção com a variação de humidade, marcando em abcissas os valores do teor de humidade, expressos em percentagem, e em ordenadas as variações de dimensões do provete, expressas em percentagem do valor medido no provete seco em estufa. Traça-se, também, analogamente, a curva representativa da variação de volume do provete com a variação de humidade, podendo as ordenadas desta curva ser obtidas por soma das ordenadas dos outros três.

Em cada uma das curvas, prolongam-se os dois segmentos rectos obtidos, como se indica na Figura 2.16, e determinam-se as coordenadas dos seus pontos de intersecção.

A retracção linear (axial, radial ou tangencial) total e a retracção volumétrica total são dadas pelas ordenadas dos pontos de intersecção das duas porções rectas das curvas respectivas.

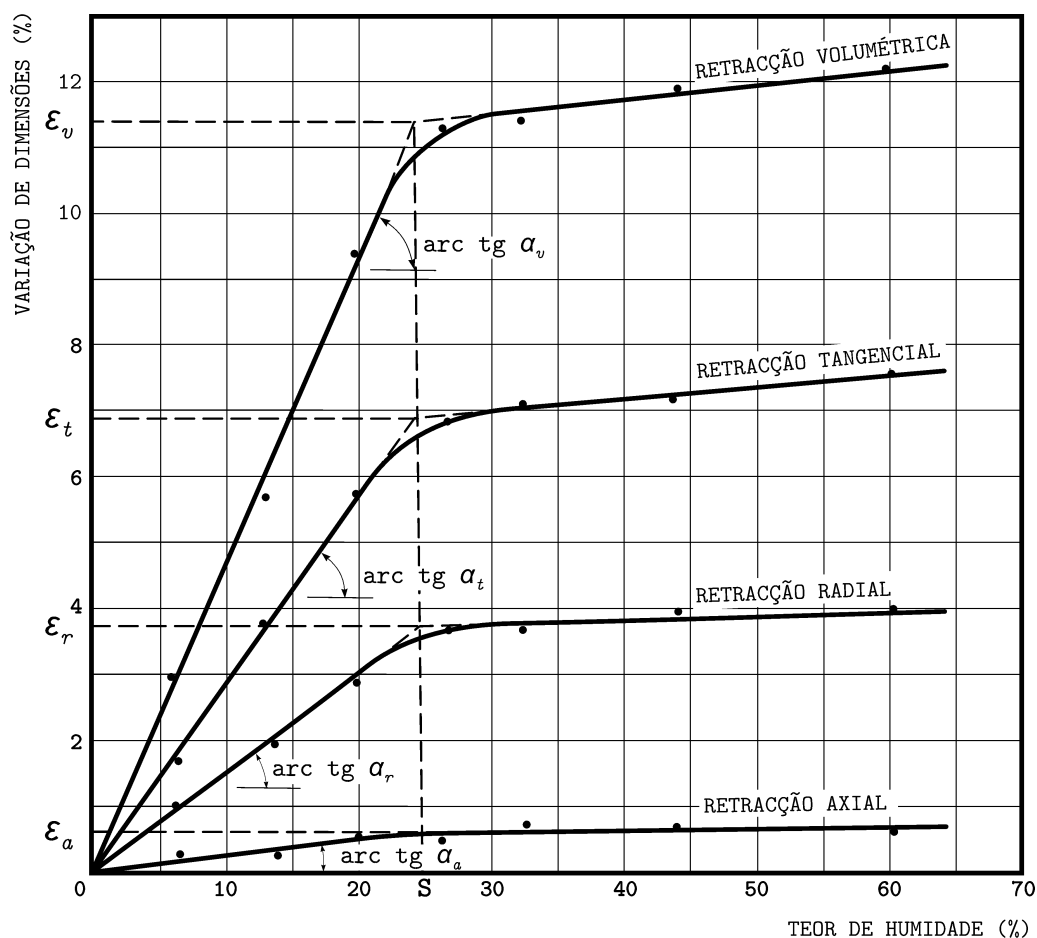


Figura 2.16 — Diagrama de retracção [10].

O coeficiente de retracção linear (axial, radial ou tangencial) e o coeficiente de retracção volumétrica são dados pelos coeficientes angulares dos ramos que, nas curvas respectivas, correspondem aos teores de humidade mais baixos. O teor de humidade de saturação das fibras é dado pela abcissa do ponto de intersecção dos dois segmentos rectos da curva correspondente à retracção volumétrica.

As justificações para a determinação das retracções lineares são óbvias, uma vez que o conhecimento apenas do valor da retracção volumétrica é insuficiente para compreender e actuar tecnicamente no sentido de minimizar o denominado *jogo da madeira*. O que fundamentalmente importa saber é a relação que existe entre as três retracções lineares, já que a madeira é um material anisotrópico. Acontece que a retracção axial é, proporcionalmente às outras, muito pequena e sem significado prático; por outro lado, a retrac-

ção tangencial tem o valor mais alto, enquanto que a retracção radial é, em geral, 1,5 a 2 vezes menor do que a tangencial. São estas diferenças entre as retracções transversais que explicam as deformações e empenas que ocorrem durante a secagem. Excepcionalmente, contudo, certas anomalias estruturais, por exemplo os denominados lenhos de tracção, têm valores da retracção axial anormalmente elevados, superiores inclusive às retracções transversais, donde podem ocorrer deformações longitudinais das peças de madeira por distribuição sectorial de tais estruturas anatómicas anómalas. Por isso ocorre o denominado empeno em arco, de face ou de canto (Figura 2.17).

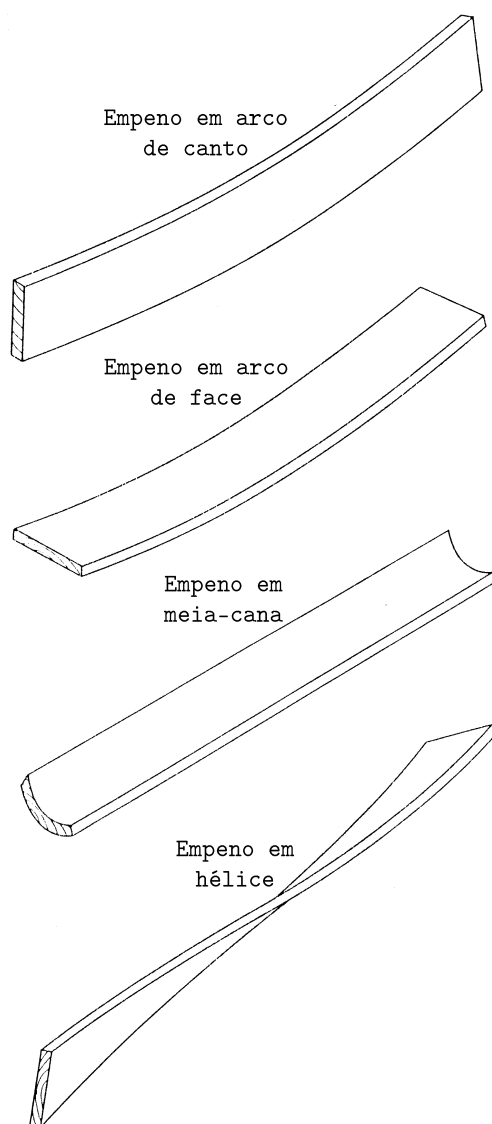


Figura 2.17 — Empenos de peças serradas [5].

Obviamente, quanto menor é o quociente entre a retracção tangencial e a retracção radial, menor é a tendência para a deformabilidade transversal das peças, e em certas madeiras, essa anisotropia de retracções é pequena, por vezes igual a 1. Estas madeiras, convenientemente secas, não se deformam mesmo quando a sua retracção volumétrica é alta ou muito forte. São excelentes madeiras de marcenaria.

Os valores das retracções lineares constantes das fichas de caracterização das madeiras nacionais são determinados em provetes com 20 mm × 20 mm × 30 mm. Acontece que a fraca dimensão transversal pode justificar que, pontualmente, se utilizem, para confirmação, provetes de 50 mm × 50 mm de secção transversal por 10 mm de dimensão axial, conforme prescrito em [10].

A aplicação prática do estudo da retracção está directamente ligada à indústria transformadora de madeira que necessita de prever o seu movimento, em especial nas espessuras e larguras das peças de madeira.

A fórmula seguinte pode ser usada para estimar a variação dimensional que uma peça de madeira terá devido à variação do seu teor de humidade. É apenas aplicável quando o teor de humidade está abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) [18] e [19].

$$\Delta d = \frac{d_i (H_i - H_f)}{\frac{100 PSF}{\epsilon} - PSF + H_i}$$

em que:

Δd — variação dimensional, expressa em mm;

d_i — dimensão inicial da peça de madeira, expressa em mm;

H_i — teor de humidade inicial, expresso em percentagem;

H_f — teor de humidade final, expresso em percentagem;

PSF — ponto de saturação das fibras, podendo em média ser considerado igual a 28 %⁹;

⁹ O ponto de saturação das fibras varia entre 22 % e 35 %, considerando-se normalmente o seu valor médio de 28 %. A retracção tangencial varia entre 6 % e 12 %, considerando-se o seu valor médio de 8 %. A retracção radial varia entre 3 % e 5 %, considerando-se de 4 % o seu valor médio. A retracção axial é cerca de 0,1 % podendo-se normalmente desprezá-la.

ε — retracção desde o estado verde ao estado seco em estufa (tangencial, radial, axial), expressa em percentagem.

Por exemplo, uma peça de madeira com 50 cm de largura encontra-se com o seu teor de humidade a 14 %, prevendo-se que, ao colocar-se noutra ambiente, o seu teor de humidade se reduza para 6 %. O valor da retracção tangencial daquela essência é de 9,9 % e pode considerar-se o valor médio para o ponto de saturação das fibras (28 %). A peça diminuirá a sua largura do seguinte valor:

$$\Delta d = \frac{50 \times (14 - 6)}{\frac{100 \times 28}{9,9} - 28 + 14} = 1,5 \text{ cm}.$$

No caso de não se conhecer ou no ser possível determinar o teor de humidade da madeira, mas sim conhecer a humidade relativa dos ambientes onde a madeira se encontra, é possível estimar o seu teor de humidade através do ábaco da Figura 2.5, ou através do modelo de *Hailwood-Horrobin* apresentado no ponto 2.3.3.4 — Curva Higroscópica da Madeira.

2.3.6.2 Determinação da Retracção da Madeira

Nos documentos normativos consultados, são conhecidas técnicas que permitem determinar a retracção, por exemplo da madeira, nas direcções axial, tangencial e radial, e ainda a retracção volumétrica, que é a soma das três anteriores.

O método utilizado neste estudo permite determinar tanto variações dimensionais de retracção como de extensão.

A determinação dos coeficientes de retracção de provetes de madeira impõe uma série de medidas [10], que de alguma forma tornam a sua determinação laboriosa, podendo ser obtida por duas vias. Na via menos trabalhosa é possível determinar os coeficientes de retracção baseando-se na hipótese de que, para teores de humidade superiores ao de saturação das fibras, as variações de humidade não provocam variação das dimensões do provete. Esta hipótese é praticamente verificada na maior parte das espécies florestais. Nos casos em que o erro introduzido pela simplificação não se possa despre-

zar, é necessário determinar as dimensões do provete e os teores de humidade correspondentes, em vários momentos da evolução da sua secagem, de tal modo intervalados que em dois ou três deles o teor de humidade do provete seja superior ao de saturação das fibras, noutros dois ou três esteja próximo desse valor e ainda noutros dois ou três lhe seja inferior.

No último método descrito é possível elaborar diagramas representativos da variação de dimensões do provete segundo cada direcção com a variação de humidade, marcando-se em abcissas os valores do teor de humidade, expressos em percentagem, e em ordenadas as variações de dimensões do provete, expressas em percentagem do valor medido no provete seco em estufa.

Em cada um dos diagramas, prolongam-se os dois troços rectos obtidos, como se indica na Figura 2.16, e determinam-se as coordenadas dos seus pontos de intersecção.

2.3.7 Coeficiente de Expansão Hígrica

A expansão dos materiais devida à adsorção de vapor de água apresenta uma importância vital na durabilidade e na estabilidade de muitos materiais de construção.

A não consideração da expansão hígrica nem da expansão térmica como acções sobre os materiais de construção, tem contribuído para a sua degradação precoce surgido até anomalias com relevante gravidade. Os materiais cerâmicos e a madeira são bons exemplos de materiais que expandem por adsorção de água, e que tem gerado inúmeras patologias [20].

Em [21], especifica-se o procedimento para determinação da expansão ou contracção hígrica de materiais de construção em função do teor de humidade, aplicável para materiais porosos e higroscópicos.

2.3.7.1 Determinação do Coeficiente de Expansão Hígrica

O coeficiente de expansão hígrica é calculado pela relação entre a variação de comprimento de um provete, provocada por uma determinada variação do teor de humidade, e o comprimento do provete no estado seco e pela diferença do teor de humidade.

A medição da variação dimensional é realizada continuamente na direcção da maior dimensão de um provete prismático, começando e terminando num estado de equilíbrio.

O processo de humedificação e secagem é realizado em vários patamares de variação do teor de humidade, de forma a obter-se o coeficiente de expansão higríca como função do teor de humidade. As medições são realizadas sob condições isotérmicas para evitar deformações induzidas pela variação da temperatura.

O conjunto de equipamentos necessários é basicamente o seguinte:

- Instrumentos de medição para determinação das dimensões dos provetes com resolução de $\pm 0,1$ mm;
- Instrumentos de medição da variação dimensional que não impeçam a dilatação higríca livre e que não sejam sensíveis à variação de humidade. Devem incluir sensores de medição da variação dimensional com resolução de $\pm 0,001$ mm, com capacidade de registo contínuo durante o ensaio;
- Câmara climática capaz de fornecer patamares variáveis de humidade relativa entre 10 % e 95 % de humidade relativa a temperatura constante, isto é, a 20 °C ou 23 °C;
- Balança;
- Estufa ventilada;
- Exsiccador.

Os ensaios devem decorrer sob condições isotérmicas, (20 ± 1) °C ou (23 ± 1) °C e as medições da variação dimensional devem ser realizadas entre o estado seco e a saturação de água livre do material, cobrindo os seguintes intervalos de humidade relativa:

- **Intervalo de humidade higroscópica:** usam-se pelo menos quatro patamares de humidade relativa igualmente espaçados entre o estado seco e 95 %. Podem usar-se, por exemplo, estado seco (< 10 %), (30 ± 2) %, (50 ± 2) %, (80 ± 2) % e (93 ± 2) % de humidade relativa;

- **Intervalo de humidade super-higroscópica:** usa-se desde o teor de humidade de equilíbrio final, $(93 \pm 2) \%$ de humidade relativa, até à saturação de água livre (u_f) dos provetes, podendo-se usar, por exemplo, os patamares de $0,5 u_f$ e $(0,95 \text{ a } 1,0) u_f$.

Assume-se que a expansão hídrica estabilizou quando, num gráfico com os valores registados continuamente, se atingir um valor final assintótico, ou pelo menos, aproximadamente 97 % do valor esperado (Figura 2.18).

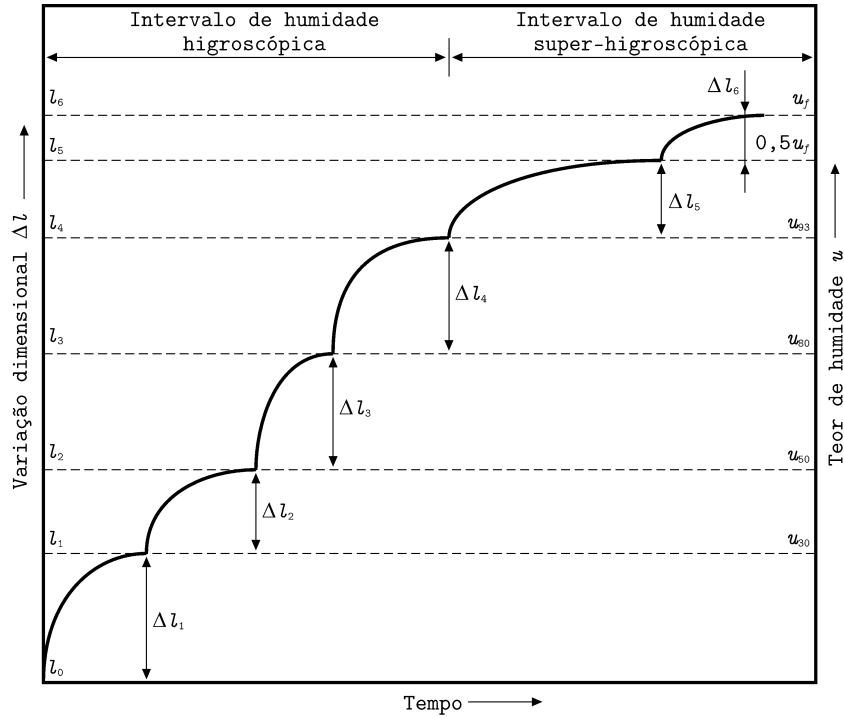


Figura 2.18 — Representação esquemática dos resultados da medição da variação dimensional hídrica [21].

Em muitos casos a assíntota é atingida claramente, pelo que o valor final real da medição da variação dimensional foi alcançado. Se não for atingida claramente uma assíntota dentro de um tempo apropriado, o valor final assintótico pode ser obtido por ajustamento dos dados por meio de uma curva de aproximação adequada.

No cálculo do coeficiente de expansão hídrica, é necessário determinar os valores da extensão hídrica $(\epsilon_h)_i$, para cada patamar de medição i , de acordo com a equação:

$$(\varepsilon_h)_i = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\sum \Delta l_i}{l_0}$$

em que:

l_i — dimensão após medição do patamar i ;

Δl_i — variação dimensional por patamar de medida i ;

$\sum \Delta l_i$ — variação dimensional acumulada após medição do patamar i .

Os valores de $(\varepsilon_h)_i$ devem ser representados graficamente em função do teor de humidade u , após cada patamar de medição, e deve desenhar-se a curva relacionando todas as $(\varepsilon_h)_i$ com u_i .

Calculam-se de seguida os valores do coeficiente de expansão higríca α_h , a partir do gradiente da curva que relaciona $(\varepsilon_h)_i$ com u_i de acordo com a expressão:

$$\alpha_h = \frac{d\varepsilon_h}{du} \approx \frac{\Delta \varepsilon_h}{\Delta u}$$

em que:

$\Delta \varepsilon_h$ — diferença na extensão higríca entre dois patamares sucessivos;

Δu — diferença no teor de humidade de equilíbrio entre dois patamares sucessivos.

O quociente $\frac{(\Delta \varepsilon_h)_i}{(\Delta u)_i}$ para cada patamar pode ser tomado como um valor simples do coeficiente de expansão higríca no valor médio \bar{u}_i para cada $(\Delta u)_i$, de acordo com as equações:

$$\begin{aligned} (\Delta \varepsilon_h)_i &= (\varepsilon_h)_i - (\varepsilon_h)_{i-1} \\ (\Delta u)_i &= u_i - u_{i-1} \\ \bar{u}_i &= \frac{u_i + u_{i-1}}{2} \end{aligned}$$

em que:

\bar{u}_i — teor de humidade médio calculado para cada patamar i ;

u_{i-1} — teor de humidade de equilíbrio antes do patamar i actual;

u_i — teor de humidade de equilíbrio após o patamar i actual;

Deve apresentar-se o gráfico do coeficiente de expansão higríca $\alpha_h = f(u)$ como resultado final no intervalo de $0 < u < u_f$ (Figura 2.19).

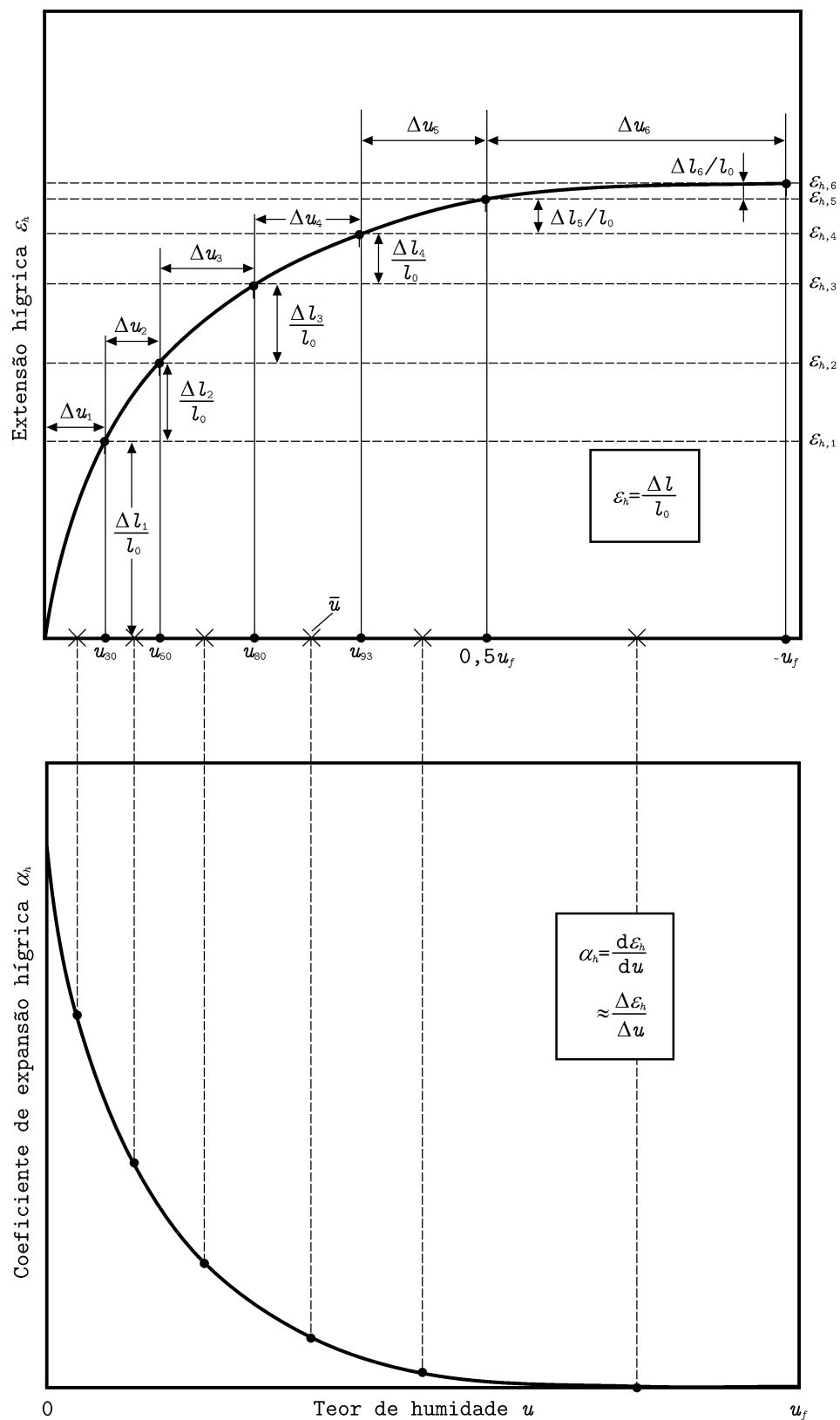


Figura 2.19 — Representação esquemática do coeficiente de expansão higríca em função do teor de humidade, obtido a partir de medições da extensão higríca e da variação do teor de humidade [21].

2.3.7.2 Coeficientes de Expansão Hídrica de Vários Materiais de Construção

Os materiais são capazes de expandir quando absorvem água (estado líquido ou estado de vapor) e de voltar a contrair quando secam. Muitos materiais de construção têm uma estrutura porosa que permite absorver mais ou menos água, e a natureza e magnitude das deformações podem assumir uma importância considerável.

A deformação devida à humidade, tal como a devida à temperatura, é geralmente reversível, excepto em alguns materiais tais como betões, argamassas, e rebocos. Para estes, a retracção inicial que ocorre durante a fase de cura podem ser consideravelmente maiores do que qualquer outra deformação reversível. Este facto é importante em relação ao uso destes materiais quando fabricados em obra. Os materiais prefabricados têm essa vantagem, uma vez que a grande deformação irreversível já se deu durante o processo de cura antes dos elementos de construção serem integrados na estrutura.

A variação do teor de humidade em muitos materiais de construção gera consideráveis variações nas suas dimensões, cuja magnitude pode ser maior do que a que é causada pela habitual variação de temperatura.

Na Tabela 2.4 apresenta-se a variação do comprimento de vários materiais de construção após imersão em água de provetes secos, bem como a variação dimensional devidos à expansão térmica a 60 °C.

As diferenças na expansão devida à humidade entre as argamassas de cal e de cimento e entre a argamassa de cimento e os tijolos devem ser tidas em conta em relação à compatibilidade dos tijolos e da argamassa.

As variações de volume em tijolos foram objecto de estudo de *Palmer* do *National Bureau of Standards* em 1931. As conclusões a que chegou foram que o diferencial entre a variação de volume entre o tijolo e a argamassa causado pela variação do teor de humidade pode ser maior do que aquele produzido pelas variações dimensionais correntes de temperatura.

Tabela 2.4 — Expansão devida à temperatura e à humidade [22].

Materiais	Expansão térmica $\Delta t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mm/m)	Expansão devida à humidade (mm/m)
Calcário	0,1 a 0,5	0,02 a 0,1
Betão	0, 5 a 0,8	0,1 a 0,2 ¹⁰
Poliéster reforçado	1	< 0,01
Aço	0,67	—
Cobre	1	—
Alumínio	1,4	—
Argamassa de cimento <i>Portland</i>	0,4 a 0,6	0,05 a 0,3
Argamassa de cal aérea	0,4 a 0,5	0,01 a 0,2
Carvalho //	0,18	?
Carvalho \perp	3,5	?

Variações dimensionais semelhantes associadas a variação do teor de humidade podem acontecer a dois materiais ligados. Um efeito de empeno pode ser produzido de forma similar ao produzido por uma chapa bimetálica devido a variação de temperatura.

Os painéis de betão prefabricado, por exemplo, que apresentam uma face de um material diferente do usado na face posterior, podem estar sujeitos a tais empenos.

Um teor de humidade variável através da espessura de um material homogéneo também terá um efeito de deformação, uma vez que o lado com um teor de humidade mais elevado irá expandir mais do que o outro lado. Tal variação do teor de humidade pode ser produzido pela migração de vapor de água ou por haver faces expostas a diferentes condições atmosféricas. A água da chuva absorvida na face exterior de um material terá um efeito semelhante [22].

2.3.8 Minimização da Variação Dimensional

Os problemas ocorridos, por exemplo, em pavimentos de madeira, que estão directamente relacionados com o inchamento da madeira devido ao aumento

¹⁰ Depende muito dos agregados. Agregados leves apresentam maiores expansões.

de humidade relativa do ar ambiente do compartimento em que se encontra, podem ser minimizados através do fraccionamento dos painéis, prevendo-se juntas de fraccionamento. Este método levanta algumas restrições de ordem estética, o que não é bem aceite, quer por projectistas, quer pelo próprio utilizador final.

Existem algumas limitações mas também excelentes possibilidades para minimizar os problemas de variação dimensional por controlo do teor de humidade da madeira no momento em que é aplicada. Também pode ser possível, dentro de certos limites, seleccionar espécies que apresentem características de variação dimensional relativamente pequenas. O cedro, por exemplo, é relativamente estável na direcção radial e consequência pode ser um material preferível para exterior.

Alguns melhoramentos também podem ser realizados em algumas aplicações por selecção da melhor direcção de corte em madeira para pavimentos, donde se tira partido da pequena variação dimensional na direcção radial em comparação com a direcção tangencial.

Existem outras técnicas, nomeadamente, através de um tratamento designado por *Plato-Process* que pode diminuir os valores da retracção em cerca de 50 % [24]. Este tratamento usa diferentes passos de tratamento e combina sucessivamente um passo de hidrotermólise¹¹ com outro de cura seca (*Tjerdtsma et al.* 1998).

¹¹ Respeitante à água (hidro-) e à decomposição de um corpo pelo calor (termólise).

Capítulo 3

Descrição do Dispositivo Experimental Desenvolvido

3.1 Constituição do Dispositivo Experimental

O estudo experimental da variação dimensional dos materiais de construção é importante para a caracterização do seu comportamento, nomeadamente no que se refere ao desempenho face à humidade e à durabilidade.

Desenvolveu-se um protótipo através da selecção de um conjunto de equipamentos de medida que apresentasse a possibilidade da recolha de dados automática reduzindo, desta forma, a dificuldade de leituras cíclicas e exigindo-se também como factor determinante, a precisão dos sensores.

O dispositivo de medida foi desenvolvido pelo Laboratório de Física das Construções – LFC da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, tendo os ensaios decorrido no interior de uma câmara climática disponível no LFC.

O dispositivo experimental utilizado na medição da variação dimensional é constituído fundamentalmente pelos seguintes componentes:

- Câmara climática;
- *Data logger*;
- Sensores LSC;
- Tabuleiros para suporte dos sensores e dos provetes;
- Computador;
- Balança de precisão.

Pode observar-se na Figura 3.1 a constituição do dispositivo experimental.

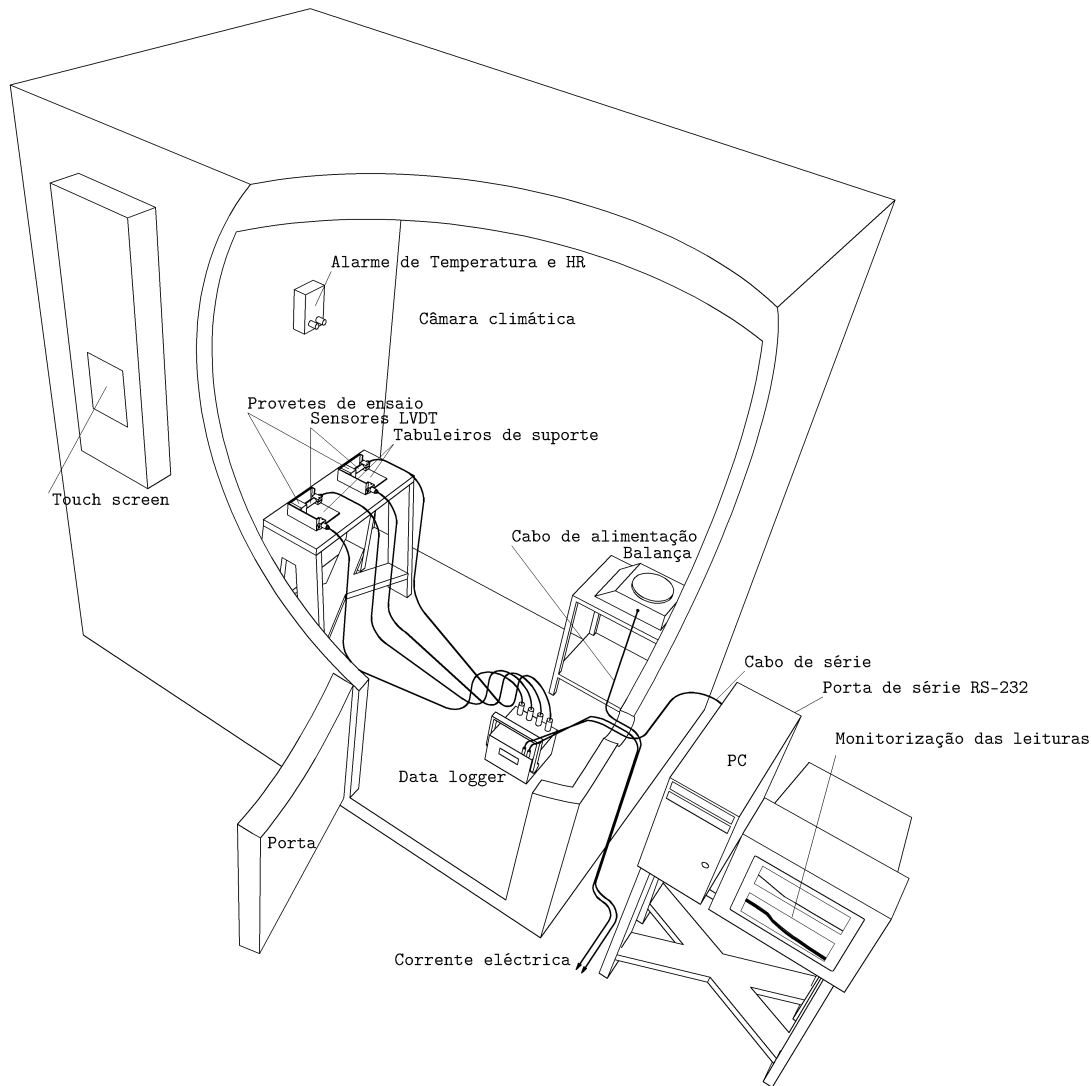


Figura 3.1 — Constituição do dispositivo experimental.

3.2 Características dos Diversos Componentes

3.2.1 Câmara Climática

A câmara climática, modelo *FitoClima 3600 EDTU*, permite o controlo da temperatura e da humidade e tem como característica principal, a possibilidade de acesso ao seu interior pelo operador do ensaio, sendo dessa forma possível pesar os provetes sem grande perturbação da temperatura e da humidade relativa interiores. É possível controlar as condições de temperatura e humidade relativa no interior da câmara através de uma unidade de controlo sensível ao toque (*touch screen*), sendo também possível registar os respec-

tivos valores num computador através de um *software* de comunicação. É descrito no § 3.3.4 a configuração da câmara climática e instruções de utilização do *software* de controlo.



Figura 3.2 — Câmara de ensaios climáticos *FitoClima 3600 EDTU*.

3.2.2 *Data Logger*

Foi adquirido pelo LFC um *data logger* (registador de dados) com 4 canais, modelo *Mikromec[®]Multisens* da marca alemã *Mikromec*. Um registador de dados é um dispositivo que recebe leituras em determinado momento no tempo, obtidas por determinados sensores. Dependendo do modelo, o registador de dados da *Mikromec[®]Multisens* pode registar, simultaneamente, até 19 canais diferentes. O *Mikromec[®]Multisens* regista dados em intervalos de 1 segundo e pode acumular até 512 000 valores. Estes registadores de dados são especialmente adaptados para fazer registos durante períodos de tempo mais longos, até longos meses.

O registador de dados pode registar e guardar as medidas de múltiplos canais sendo ainda possível enviar os dados para um computador ou para uma impressora. Utilizando de forma adequada as características disponíveis é possível supervisionar e aperfeiçoar eficazmente todos os processos.

O *Mikromec[®]Multisens* pode ser operado através do painel de controlo ou através de um computador.



Figura 3.3 — *Data logger*.

O dispositivo pode ser adquirido com diversos canais de aquisição, estando disponíveis registadores de 4 a 19 canais. Cada ficha de entrada é atribuída a um canal único. Os modos de funcionamento do *Mikromec[®]Multisens* são os seguintes:

- Modo de entrada: por exemplo, o utilizador escolhe um sensor;
- Modo de medida e registo: os valores medidos são exibidos continuamente no visor LCD¹;
- Modo de medição rápida: todas as outras actividades estão limitadas para ajudar na medição rápida;
- Modo de Saída de dados: dados já registados são transferidos para um computador. Durante este período não é possível efectuar qualquer tipo de medição.

Para permitir ao utilizador a conexão dos diferentes tipos de sensores ao sistema, os registadores são dotados de portas analógicas roscadas (porta An) com 14 pinos. Dependendo do modelo escolhido, o dispositivo vem equipado com 2, 3, 8 ou 16 destes canais analógicos. O *Mikromec[®]Multisens* dispõe de um sistema com elevado grau de precisão e elevada resolução.

¹ LCD, abreviatura do inglês *Liquid Crystal Display*. Ecrã de cristais líquidos.

O registador de dados pode ser configurado e pode transferir os registos através de uma porta de série. O *software* de análise *MM-grafix* da empresa *Technics* desenvolvido na plataforma *Windows* permite a gestão dos dados. O *software* *MessNetz* da mesma empresa permite também o arquivo contínuo e sem interrupções dos resultados numa base de dados. Os resultados podem ser transferidos directamente para uma folha de cálculo onde podem ser trabalhados mais facilmente.

Os comandos ligação de série estão completamente documentados permitindo ao utilizador programar as suas próprias soluções. Os controladores (*drivers*) disponíveis para o *Diadema*, *DasyLab* e *Flexpro* permitem ao utilizador programar mais rapidamente as suas próprias soluções.

Os registadores de dados mais recentes oferecem funções novas reflectidas no *software* de análise *MM-grafix*, versão 5.0, sendo as funções mais importantes as seguintes:

- Uso da linguagem de comandos para comunicar a partir de outros periféricos;
- Operação simplificada dos registadores de dados em modo remoto com a reprodução dos registadores de dados como um instrumento virtual no monitor do computador;
- Poder armazenar 512 000 leituras por gravação;
- Processamento do estado das leituras;
- Medições activadas por alteração do estado das leituras.

O utilizador pode modificar a tarefa de medida, a configuração do canal e as tarefas de gravação a partir do próprio teclado, estando os resultados visíveis num ecrã de cristais líquidos.

É possível comunicar com o dispositivo se se dispuser de um modem, podendo ser efectuada a configuração ou outras tarefas através da comunicação com um *software* próprio a partir de um computador. Também é possível o utilizador usar o registador a partir de *software* criado por si, através de uma interface com comandos especiais, estando provido com três interfaces diferentes de comunicação:

- Teclado e ecrã LCD;
- *Software* de análise e de comunicação: *MM-grafix*, *MMforExcel* ou *MessNetz*;
- Linguagem de comandos: *mcl* (*multisens command language*).

3.2.3 Sensores LSC/LDS

Os sensores LSC², também denominados LDS³, permitem medir variações de comprimentos com elevada precisão e de modo contínuo. O deslocamento máximo que é possível medir nos sensores adquiridos pelo LFC é de 10 mm estando a sua precisão limitada apenas pela resolução do sistema de aquisição de dados.

Os transdutores de deslocamento LSC produzem uma voltagem de saída proporcional ao deslocamento do veio central através de um sensor de força com uma resistência de 350 Ω , proporcionando características excelentes de compensação de temperatura e de linearidade.

Os sensores LSC apresentam versatilidade, precisão e compatibilidade com outros sistemas com excitação da resistência desde 2 V a 10 V, produzindo resultados com forças inferiores a 4,4 N.



Figura 3.4 — Sensor LSC.

O funcionamento do LSC é muito simples (Figura 3.5); à medida que o veio se desloca pelo corpo do sensor, a cunha, fixa ao veio, deforma os elementos da mola e aumenta a tensão medida pelo deflectómetro localizado perto da extremidade fixa da mola. Este funcionamento apresenta duas características excelentes:

² LSC, do inglês *Linear Strain Conversion*. Transdutor de conversão de tensão linear.

³ LDS, do inglês *Linear Displacement Sensor*. Sensor de deslocamento linear.

- resolução verdadeiramente infinita, significando que o LSC pode responder até ao movimento mais minúsculo da parte central e produzir uma leitura. A legibilidade da electrónica exterior (*Data logger*) representa a única limitação na resolução;
- repetibilidade nula originada pela simetria inerente da construção de LSC. A posição nula de um LSC é extremamente estável e repetitiva. Assim o LSC pode ser usado como um indicador de posição nula excelente em sistemas de controlo de circuitos fechados de elevado ganho.

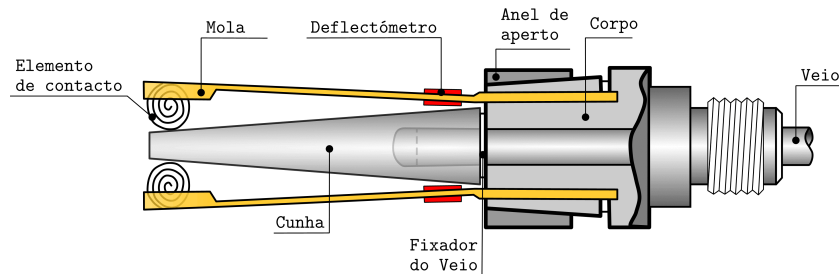


Figura 3.5 — Esquema de um sensor LSC/LDS.

Um LSC é predominantemente sensível aos efeitos do movimento axial da parte central e relativamente pouco sensível ao movimento radial. Isto significa que o LSC pode ser usado em aplicações onde a parte central não se move exactamente em linha recta.

A combinação dos materiais usada num LSC e as técnicas usadas para os juntar resulta num transdutor extremamente robusto e durável. Esta construção robusta permite a um LSC continuar a funcionar até mesmo depois da exposição a cargas de choque significativas e níveis de vibração elevados que se podem encontrar em ambientes industriais.

3.2.4 Tabuleiros para Suporte dos Sensores e dos Provetes de Madeira

Foi necessário projectar dois tabuleiros para suporte dos sensores e dos provetes de madeira, que viriam a ser construídos pela mesma empresa que forneceu os restantes componentes do sistema (Figura 3.6 e Figura 3.7).

A exigência da estabilidade dimensional dos tabuleiros teria de ser garantida, pelo que foram projectados em chapa aço inox com 3 mm de espessura. As suas dimensões foram condicionadas pelas dimensões dos provetes e dos sensores. As referências [9] e [10] indicam provetes de madeira com as dimensões de 50 mm × 50 mm × 10 mm, sendo possível, no entanto, testar provetes até 90 mm de dimensão máxima.

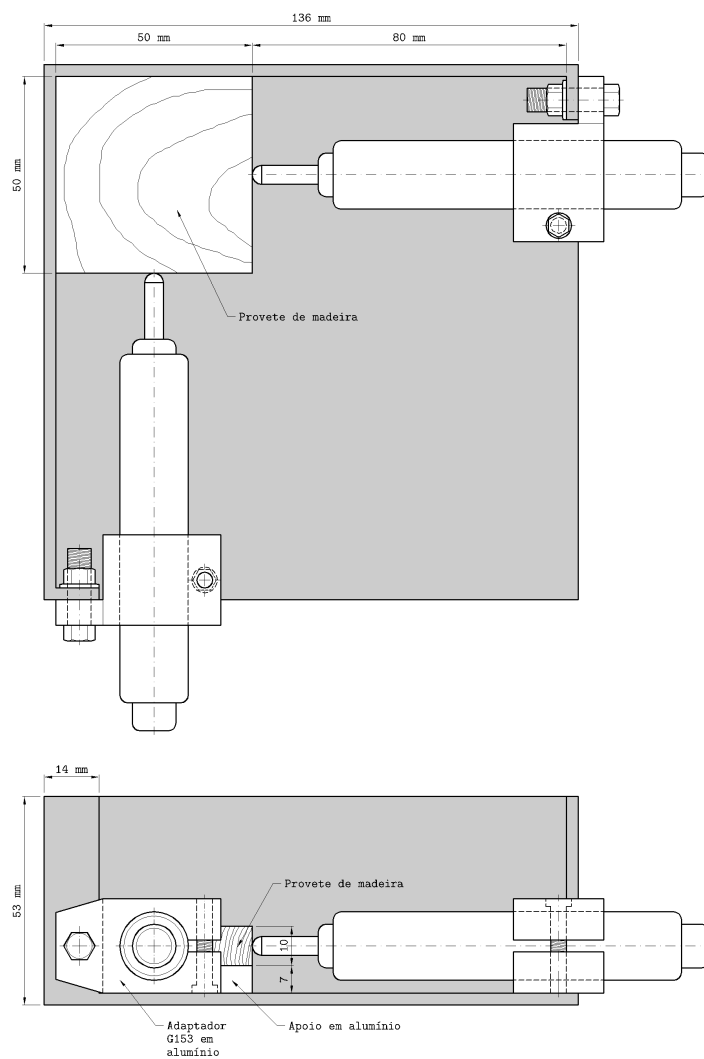


Figura 3.6 — Projecto do tabuleiro.

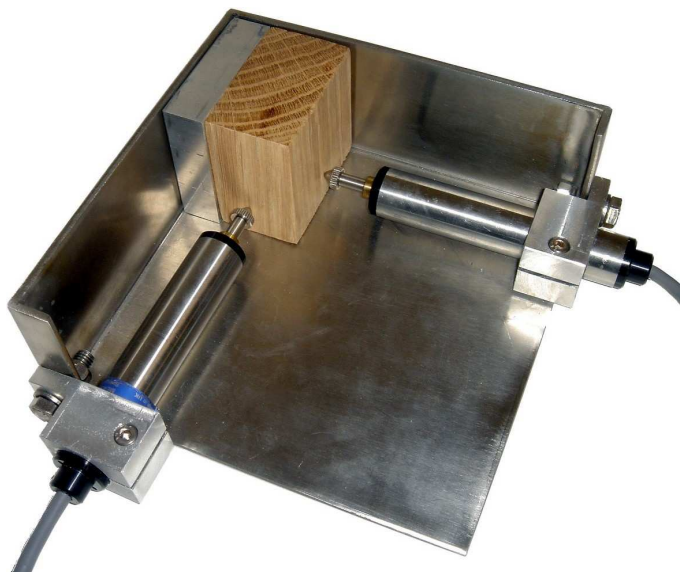


Figura 3.7 — Protótipo.

3.2.5 Computador

O *data logger* estava conectado a um computador onde eram registados os valores das leituras dos 4 sensores. O programa de recolha de dados permite obter um gráfico das leituras recolhidas em contínuo (Figura 3.8), sendo no entanto registadas em ficheiro *ASCII*⁴, por opção do operador, leituras de 10 minutos em 10 minutos sendo possível, no entanto, intervalos mais curtos. Veio a constatar-se mais tarde, que leituras horárias seriam suficientes e ocupavam menos espaço em memória, facilitando também o tratamento dos dados para a construção das curvas de variação dimensional.

⁴ ASCII, sigla de *American Standard Code for Information Interchange*. Código utilizado para permuta de dados informáticos, que codifica cada carácter como uma combinação de sete *bits*.

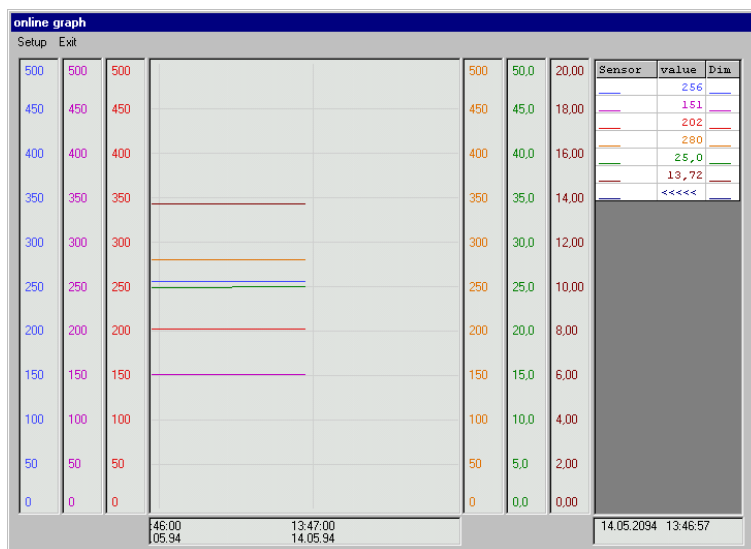


Figura 3.8 — Recolha de dados em contínuo.

3.3 Manual de Funcionamento

3.3.1 Configuração do *Data Logger*

A configuração dos sensores que viriam a ser utilizados no *data logger* foi realizada pela empresa de fornecimento do equipamento, sendo necessário, no entanto, preparar o equipamento para a transferência das leituras efectuadas a um computador onde se procederia ao armazenamento dos dados.

A transferência de dados é realizada através de uma porta RS232 e foi escolhida uma velocidade de 9600 baud⁵, podendo ser alterada desde que o programa de recolha de dados mantenha a mesma velocidade de transferência (Figura 3.9). Alguns computadores têm problemas com perda de dados quando se usam velocidades elevadas. Também existem problemas quando se usam velocidades baixas, no caso do *data logger* não ter tempo para transferir toda a informação se existirem medidas em todos os canais em intervalos de tempo curtos, com consequente perda de dados. A transmissão é realiza-

⁵ *Baud rate*, em telegrafia e em telecomunicações, unidade de velocidade de modulação que vale um impulso por segundo. Adoptado do nome de *Émile Baudot*, engenheiro francês (1845–1903), inventor do telégrafo múltiplo impressor (1874) e de um aparelho de transmissão automática (1894).

da a 8 bits de dados, sem paridade e 1 bit de paragem, não sendo possível ajustar.



Figura 3.9 — Configuração da velocidade de transmissão de dados.

A recolha de informação num computador é controlada pelo *software* de análise *MM-grafix*, da *Technetics*, usado na representação de curvas. O *data logger* é conectado com um cabo de série a uma porta de série livre no computador (COM1 ou COM2). As propriedades da transmissão têm que ser as mesmas que as do *data logger*. No presente estudo foi adoptada uma transmissão em linha com uma porta RS232, sendo os dados armazenados num computador, libertando, dessa forma, a memória do *data logger* (Figura 3.10).

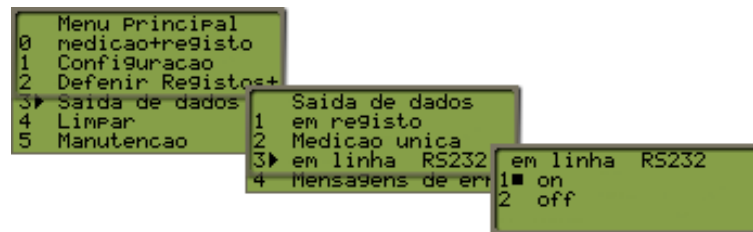


Figura 3.10 — Configuração da saída de dados.

3.3.2 Escalonamento e Calibração dos Sensores LSC/LDS

Como equipamento electrónico de medida, o *data logger* apenas mede e regista magnitudes eléctricas. Muitas vezes, a voltagem é uma propriedade de pouco interesse, pois a informação necessária é a magnitude de uma grandeza física que o sensor está realmente a medir, como por exemplo a variação dimensional.

O modo de conversão que o *data logger* usa para interpretar e registrar os valores da voltagem é conhecido como escala. Escalonar sensores é então a mudança de escala. Por exemplo, um sensor de temperatura fornece uma resistência de 0 V a 0 °C e de 1 V a 100 °C. O *data logger* tem que conhecer quais os limites da voltagem, sendo, neste caso, 1 V = 100 °C.

O *data logger* disponibiliza 9 dígitos para cada medida, i.e. -22.34mV. Quatro desses dígitos são usados para o valor da medida (2234), um para o sinal (\pm), um para o ponto decimal e três para a unidade de medida. Os valores numéricos e o prefixo (\pm) abrangem uma extensão desde -5000 a +4999, totalizando uma extensão de 10 000 valores. Existem apenas 4 possibilidades para a colocação do ponto decimal: -5000... 4999, -500.0... 499.0, -50.00... 49.99 e -5.000... 4.999.

O escalonamento, isto é, a conversão da escala original (valor na unidade X) para a nova escala (valor na unidade Y), é realizada atribuindo dois pontos de referência para cada unidade. Devido ao limite de memória, o *data logger* apenas permite guardar 4 casas decimais mais o separador decimal e o sinal, totalizando 10 000 partes (Figura 3.11).

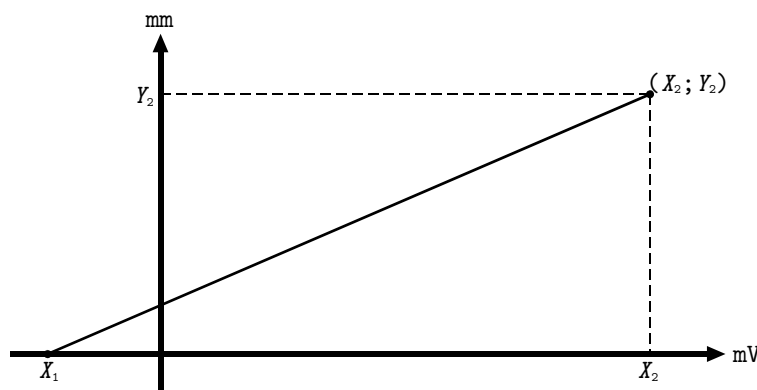


Figura 3.11 — Esquema de escalonamento.

O escalonamento foi escolhido tendo presente os limites de medida dos sensores LSC. O curso possível para os sensores adquiridos é de 10 mm, logo as leituras iriam variar entre 0,00 mm e 10,00 mm. O escalonamento dos sensores foi realizado atribuindo os valores apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 — Escalonamento dos sensores.

Sensores	X_1 [mV]	Y_1 [mm]	X_2 [mV]	Y_2 [mm]
LSC 1	-0,08	0,00	23,73	10,00
LSC 2	-0,22	0,00	25,56	10,00
LSC 3	-0,21	0,00	26,07	10,00
LSC 4	-0,10	0,00	25,56	10,00

A introdução dos valores das leituras X pode ser realizada por duas vias, directamente através do teclado, sendo obviamente necessário conhecer a voltagem da leitura, ou através da medida do sinal aquando da pressão do sensor até ao limite do curso (10 mm), opção preferencial e a adoptada no escalonamento dos sensores.

Na Figura 3.12 pode ser observado a sequência de menus apresentados pelo *data logger* para o escalonamento dos sensores.



Figura 3.12 — Menus apresentados pelo *data logger* para o escalonamento.

A selecção de cada item é confirmada pela tecla SEL (*select*) do equipamento para passagem ao menu seguinte. Após a selecção do sensor que se pretende escalonar, é apresentado um aviso de que os valores anteriores serão sobrepostos, podendo, no entanto, voltar-se ao menu anterior através da tecla EXIT.

No menu de escalonamento é possível ver o nome do sensor, a unidade de medida, o número de casas decimais e os pontos de escalonamento.

Seleccionando-se um valor da unidade X (em mV), é pedida a forma de introdução da leitura através, ou do teclado, ou por medição por parte do equipamento. Tratando-se do primeiro valor, X_1 , e mantendo o sensor estendido, e para tal pode ser pressionado e solto bruscamente de forma a obter-se a extensão máxima, permite-se ao *data logger* recolher o sinal nessa posição.

O passo seguinte é pressionar o LSC e fazer a recolha do sinal para o segundo valor, X_2 .

O valor de Y_1 é naturalmente nulo (0,00 mm) e o valor de Y_2 é o valor máximo do curso do sensor (10,00 mm).

3.3.3 Programa de Recolha e Gestão de Dados

O equipamento *Mikromec[®]Multisens* permite o armazenamento das leituras e a transferência de variadíssimas formas, desde a utilização de *software* de comunicação através da porta série (*HyperTerminal* do *Windows*, *Telix*, *MM-grafix*, etc.), da linha telefónica e modem, da rede GSM e de cartões de memória PCMCIA).

Uma vez que havia sido adquirido o *software MM-grafix*, a gestão e o armazenamento ficou a cargo de um computador controlado por esse programa. Optou-se por não guardar os dados no equipamento e transferi-los para o computador à posteriori pelas seguintes razões:

- Limite da capacidade de memória do equipamento;
- Longos períodos de medição com intervalos curtos (10 minutos) esgotariam rapidamente a capacidade do equipamento com consequente perda de dados;
- Durante os períodos de transferência de dados não haveria possibilidade de recolha.

Por estes motivos foi considerada a recolha directa dos dados a partir do programa *MM-grafix*, permitindo a visualização de gráficos das leituras em tempo real. Desta forma, o armazenamento far-se-ia num computador, sendo possível, em qualquer momento, observar o comportamento dos provetes e transferir os dados para outro computador sem perturbação dos registos.

Na Figura 3.13 pode observar-se o ambiente gráfico do programa *MM-grafix* em duas situações: sem conexão e conectado ao *Mikromec[®]Multisens*, representado por um pequeno quadrado verde e por um telefone durante a conexão.

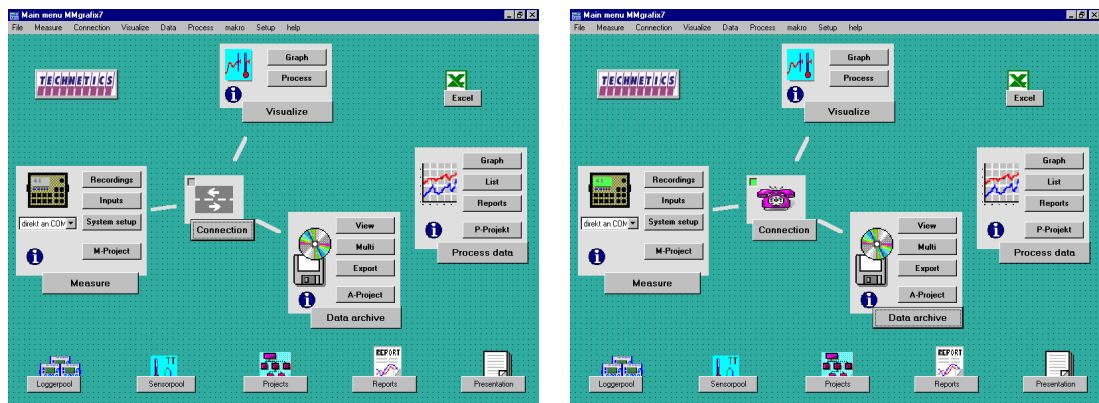


Figura 3.13 — Ambiente gráfico do programa *MM-grafix*.

A conexão entre equipamentos apresenta, por vezes, determinadas dificuldades tendo sido necessário recorrer a um comando do *software* que permite detectar a porta COM que se encontra ligada ao *Mikromec[®]Multisens*.

Na Figura 3.14 apresentam-se as janelas de diálogo que possibilitam instalar e verificar quais as portas disponíveis e em comunicação com o *data logger*.

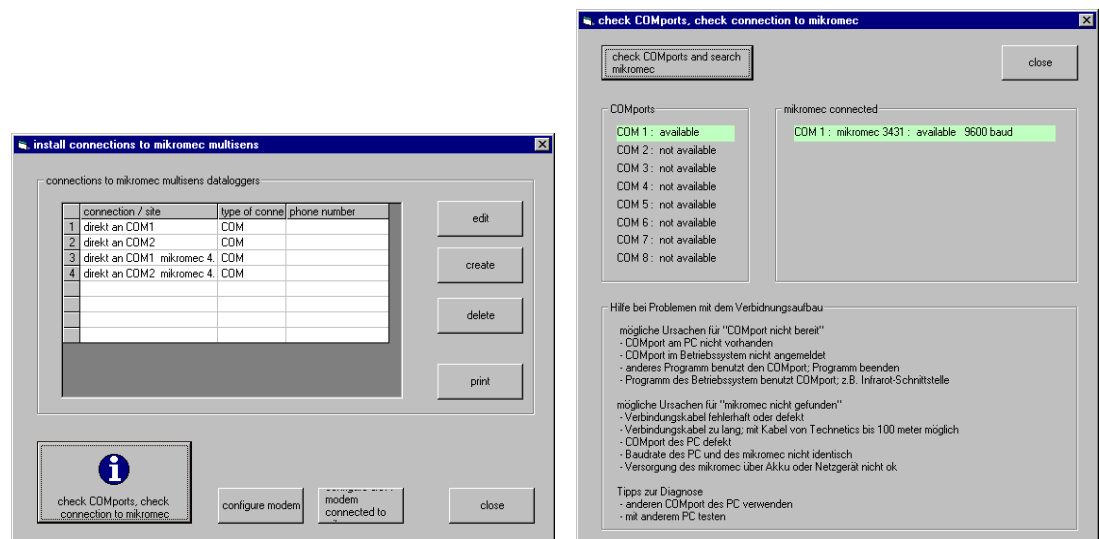


Figura 3.14 — Janelas de diálogo de instalação e verificação de portas de ligação ao *data logger*.

Após a confirmação da porta disponível, é então possível seleccionar a ligação através da janela de diálogo apresentada na Figura 3.15.

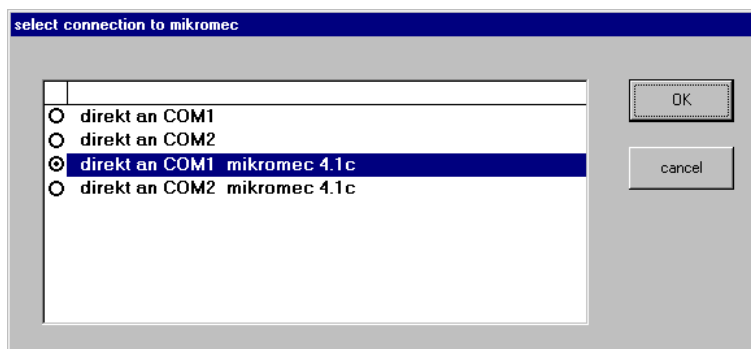


Figura 3.15 — Janela de diálogo de selecção da porta de ligação.

3.3.4 Configuração da Câmara Climática

Como referido no parágrafo 3.2.1, o controlador *ClimaPlus V* baseia-se numa unidade de écran sensível ao toque (*Touch Screen*) que permite o ajuste e programação de parâmetros de controlo e funcionamento de câmaras climáticas *FitoClima*.

O écran sensível ao toque permite uma excelente interacção entre o utilizador e a câmara com os vários menus do controlador a proporcionarem uma grande facilidade na sua utilização.

O *ClimaPlus V* é constituído por um conjunto de quadros onde se apresenta informação para o utilizador e onde também estão inseridos botões para pressionar com determinadas funcionalidades. Os botões são facilmente reconhecíveis pois têm o formato que se apresenta na Figura 3.16:



Figura 3.16 — Botões do controlador *ClimaPlus V*.

Através de um toque num botão a sua funcionalidade é executada. Por exemplo, no botão de *Set Point* é chamado um quadro que permite alterar esse valor de controlo.

O *ClimaPlus V* é um controlador capaz de controlar a temperatura e a humidade relativa em câmaras climáticas *FitoClima* entre outras. Para cada

uma das variáveis de processo⁶ pode ser estabelecido um valor fixo desejável, o chamado *Set Point*⁷. Através da execução de programas, é possível alterar o *Set Point* ao longo do tempo gerando rampas de controlo.

Apresentam-se de seguida alguns dos quadros que compõem o controlador *ClimaPlus V*. Na Figura 3.17 apresenta-se o quadro principal.

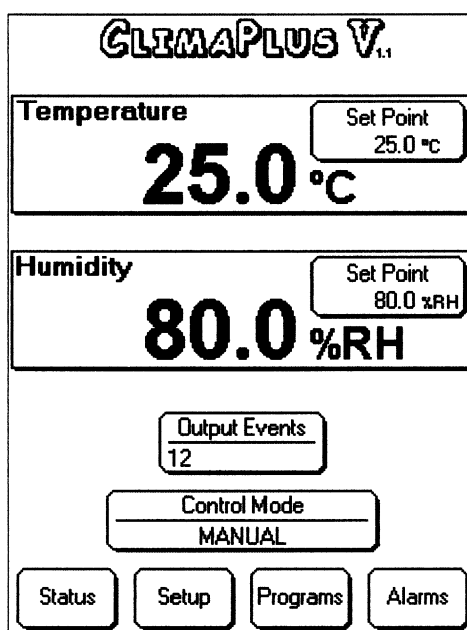


Figura 3.17 — Quadro principal do controlador *ClimaPlus V*.

No quadro *Temperature* é apresentada a temperatura actual da câmara. No botão *Set Point* pode ser alterado o valor desejado para essa temperatura. No quadro *Humidity* é apresentada a humidade relativa actual da câmara cujo valor desejado pode ser alterado no botão *Set Point*. O botão *Output Events* permite seleccionar que eventos estão activos/inactivos. O botão *Control Mode* permite colocar o controlador em dois modos:

- **Manual**, controlo dos parâmetros da câmara pelos valores de *Set Point* desejados;

⁶ Variável de processo: variável que se pretende controlar; numa câmara climática, as variáveis de processo podem ser a temperatura e a humidade relativa.

⁷ *Set Point*: valor desejado para a variável de processo. Pretendendo ter 50 °C no interior da câmara, o *Set Point* deverá ser 50 °C.

- **Program**, um programa em execução gera os valores de *Set Point* de temperatura e humidade relativa, bem como o estado dos eventos em cada segmento de programa.

O botão *Status* permite visualizar o estado do controlador (Figura 3.18). O botão *Setup* permite o acesso à configuração do controlador. O botão *Programs* permite o acesso à construção e/ou alteração de programas. O botão *Alarms* permite o acesso às definições de alarmes do controlador bem como ao botão de *Mute* que permite silenciar o alarme sonoro.

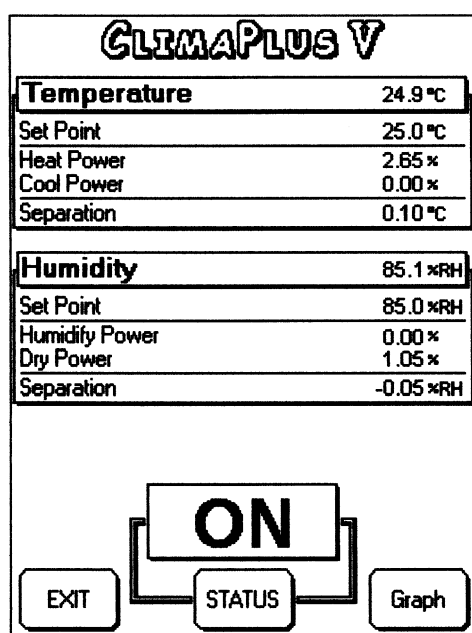


Figura 3.18 — Quadro de Estado (*Status*) do *ClimaPlus V*.

No quadro de Estado é possível a visualização da temperatura actual da câmara e respectivo *Set Point*, potência de calor e de frio e separação dinâmica entre as acções de calor e frio. É também visível o valor da humidade relativa actual da câmara e respectivo *Set Point*, potência de humidificação e de secagem e separação dinâmica entre as acções de humidificação e secagem.

O botão *Exit* permite a saída do quadro.

O botão *Graph* permite a visualização gráfica da evolução da temperatura e da humidade relativa na câmara (Figura 3.19). O botão *Status* permite li-

gar (*On*) ou desligar (*Off*) a câmara. Passados 5 minutos após colocação em *Off*, a água é despejada para evitar a saturação do interior da câmara.

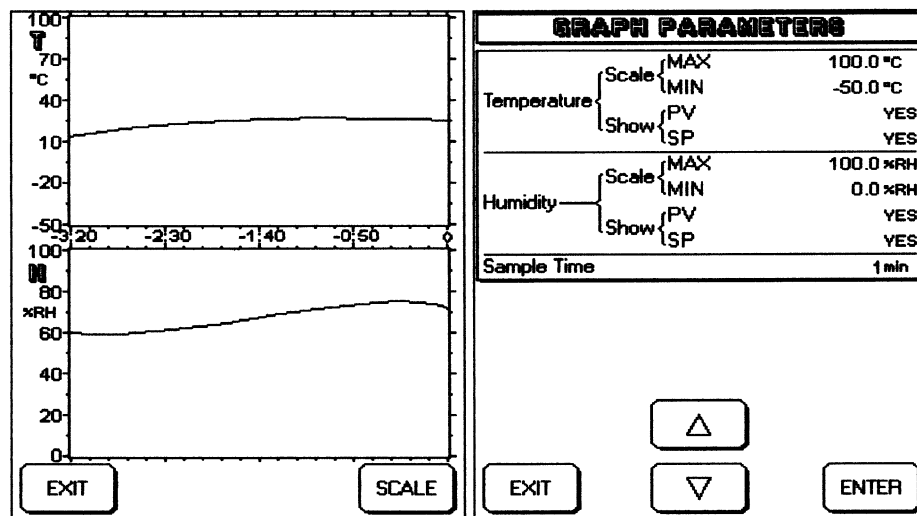


Figura 3.19 — Quadros *Graph* e *Scale* do *ClimaPlus V*.

No quadro *Graph Parameters* é possível alterar a escala de visualização gráfica do que se deseja visualizar e o intervalo entre amostras. A alteração do intervalo entre amostras (*Sample Time*) dá início a um novo quadro de visualização.

No quadro de *Setup* é possível alterar a configuração do controlador (Figura 3.20):

- ***Access Type*** define o tipo de utilização do controlador sendo necessário uma *Password* (modo *User*: sem acesso à alteração de dados; modo *Administrator*: com acesso à alteração dos dados normais e a todos os parâmetros do controlador);
- ***Date*** e ***Time*** permitem a alteração da data e hora do controlador;
- ***Display On*** e ***Display Off*** permitem definir a hora em que o ecrã LCD fica iluminado e se apaga (se for definido 0:0:0 para ambos, o ecrã LCD fica sempre apagado excepto quando este é pressionado);

- **Display Off Delay** define o tempo ao fim do qual o ecrã LCD deixa de ficar iluminado desde que não seja pressionado nenhum botão;
- **Display Contrast** define o contraste entre os caracteres e o fundo do ecrã LCD;
- **Key Click** define o som de tecla ao pressionar um botão;
- **Parameters** são os parâmetros de controlo alteráveis apenas em modo *Administrator* (algoritmo de controlo PID e outros parâmetros).

SETUP	
Access Type	USER
Password {	
User	*****
Administrator	*****
Date	2001/10/29
Time	12:45:05
Display On	0:00:00
Display Off	0:00:00
Display Off Delay	1 min
Display Contrast	45
Key Click	5 ms
Parameters {	
Temperature	ENTER
Humidity	ENTER

△

EXIT

▽

ENTER

Figura 3.20 — Quadro *Setup* do *ClimaPlus V*.

No quadro *Programs* (Figura 3.21) é permitida a construção e/ou alteração de programas e é apresentada a listagem dos 10 primeiros (o controlador tem capacidade para 100 programas de 50 segmentos cada).

O *Soak Band* é um parâmetro que impede a passagem de um segmento para o seguinte enquanto a variável de controlo (temperatura e/ou humidade relativa) não estiver dentro da vizinhança definida.

Cada programa é constituído por 50 segmentos mais o segmento inicial/final. Cada segmento é constituído por:

- *Set Point* de temperatura;
- *Guar. Soak (Soak Band)* de temperatura activa (*Enable*) ou inactiva (*Disable*);
- *Set Point* de humidade;
- *Guar. Soak (Soak Band)* de humidade activa (*Enable*) ou inactiva (*Disable*);
- Tempo de segmento: tempo ao fim do qual a variável de processo deverá ser igual ao *Set Point* introduzido. Se o tempo for zero, significa fim do programa;
- Eventos activos;
- Número de *Recycles* e segmento para onde é feito esse *recycle (Next Segment)*. *Recycles* é um número que permite ao programa saltar para um outro segmento definido em *Next Segment*. Caso não seja definido o *Recycle* ou colocado a zero, é executado o segmento seguinte.

PROGRAMS		
View/Edit Program		ENTER
Soak Band {	Temperature	DISABLE °C
	Humidity	DISABLE %RH
Program 1	Ciclo 25C 50% a 95% RH	
Program 2	Calor Húmido	
Program 3	Ciclo 50C a -50C	
Program 4		
Program 5		
Program 6		
Program 7		
Program 8		
Program 9	Teste 24xPT	
Program 10		

△

▽

ENTER

EXIT

Figura 3.21 — Quadro *Programs* do *ClimaPlus V*.

Ao terminar o programa poderá ser executado um outro em sequência (ou o mesmo) através da programação do *Next Program*.

O quadro de construção e/ou alteração de programas (Figura 3.22), *Program Name* define o nome simbólico a dar ao programa. Se se pretender que a evolução de um segmento para o seguinte só possa dar-se após a variável de processo atingir o *Set Point* predefinido, deverá ligar-se a função *Guar. Soak* e deverá programar-se um valor para a *Soak Band* no quadro *Programs*.

Program 1		Segment 1
Program Name		
Temperature	Set Point	25.0 °C
	Guar. Soak	DISABLE
Humidity	Set Point	80.0 %RH
	Guar. Soak	DISABLE
⌚ Segment Time		1:00:00
↔ Output Events		
↺ Recycles		0
↻ Next Segment		
Next Program		HALT

Previous Segment
⬆
Next Segment

EXIT
⬇
ENTER

Figura 3.22 — Quadro de construção e/ou alteração de programas.

O significado dos restantes parâmetros apresentados no quadro é o seguinte:

- **Segmento 0:** Segmento de Início/Fim. O programa inicia-se gerando uma rampa desde o segmento 0 até ao segmento 1. Quando o programa termina o *Set Point* da câmara é colocado no valor definido neste segmento se *Next Program* for *Halt*, ou a câmara é colocada em *Off* no caso de *Next Program* ter sido programado para *Off*;
- **Segmento *n*:** o *Set Point* introduzido é o valor que a variável de processo atingirá após o tempo do segmento. Por exemplo, se o segmento 1 for 10 °C, o segmento 2 for 20 °C e o tempo do segmento 2 for 1 hora, a câmara evoluirá de 10 °C para 20 °C ao longo de

1 hora, ou seja, após 15 minutos a câmara deverá estar a 12,5 °C, após 30 minutos em 15 °C e assim sucessivamente;

- **Recycles:** execução de ciclos dentro de um programa. Se no Segmento 7 for programado *Recycle* = 2 e *Next Segment* = 4, o ciclo Segmento 4 - Segmento 5 - Segmento 6 - Segmento 7 será executado 3 vezes (a vez natural mais duas repetições).

O controlador *ClimaPlus V* dispõe de 100 programas de 50 segmentos capazes de gerar rampas, ciclos e reciclos bem como o encadeamento entre todos os programas.

Cada segmento de programa indica os valores de *Set Point* que serão atingidos pela câmara após decorrido o tempo de segmento programado. Se, por exemplo, for preparado o programa apresentado na Figura 3.23, o segmento 3 é programado com o *Segment Time* a zero o que indica fim do programa. O programa é iniciado com a temperatura a 25 °C e humidade relativa a 80 %. Durante 1 hora essas condições serão mantidas (de acordo com o segmento 1) e, na hora seguinte, a temperatura evoluirá até 50 °C à velocidade de 25 °C por hora, ou seja, decorrido o tempo do segmento 2 a câmara terá o *Set Point* em 50 °C.

Program 1		Segment 0	
Program Name			
Temperature	Set Point	25.0 °C	
	Guar. Soak	DISABLE	
Humidity	Set Point	80.0 %RH	
	Guar. Soak	DISABLE	
Segment Time		0:00:00	
Output Events			
Recycles		0	
Next Segment			
Next Program		HALT	
<div> <div>Previous Segment</div> <div>△</div> <div>Next Segment</div> </div> <div> <div>EXIT</div> <div>▽</div> <div>ENTER</div> </div>			

Program 1		Segment 1	
Program Name			
Temperature	Set Point	25.0 °C	
	Guar. Soak	DISABLE	
Humidity	Set Point	80.0 %RH	
	Guar. Soak	DISABLE	
Segment Time		1:00:00	
Output Events			
Recycles		0	
Next Segment			
Next Program		HALT	
<div> <div>Previous Segment</div> <div>△</div> <div>Next Segment</div> </div> <div> <div>EXIT</div> <div>▽</div> <div>ENTER</div> </div>			

Program 1		Segment 2	
Program Name			
Temperature	Set Point	50.0 °C	
	Guar. Soak	DISABLE	
Humidity	Set Point	80.0 %RH	
	Guar. Soak	DISABLE	
Segment Time		1:00:00	
Output Events			
Recycles		0	
Next Segment			
Next Program		HALT	
<div> <div>Previous Segment</div> <div>△</div> <div>Next Segment</div> </div> <div> <div>EXIT</div> <div>▽</div> <div>ENTER</div> </div>			

Figura 3.23 — Exemplo de um programa.

Através dos *Recycles* o programa pode ter uma evolução extremamente complexa e flexível. Um *Recycle* é a possibilidade de executar um conjunto de

segmentos em ciclo. Por defeito, nenhum segmento possui *Recycles* de tal forma que os segmentos são executados em sequência (a seguir ao segmento 1 é executado o 2 e depois o 3 e assim sucessivamente). Se for programado um valor para o campo *Recycles* deverá ser programado um valor para o campo *Next Segment* sendo este segundo campo o segmento que será executado após o segmento actual, sendo tal procedimento executado o número de vezes programado no campo *Recycles*. Por exemplo (Figura 3.24):

- **Segmento 1:** tal como no exemplo anterior;
- **Segmento 2:** tal como no exemplo anterior excepto que, no campo *Recycles* é programado o valor 2 e no campo *Next Segment* é programado o segmento 1;
- **Segmento 3:** tal como no exemplo anterior (*Segment Time* a zero indica fim de programa).

O segmento 1 é executado tal como anteriormente e o segmento 2 também. Terminado o segmento 2, o programa repete duas vezes o segmento 1 seguido pelo segmento 2.

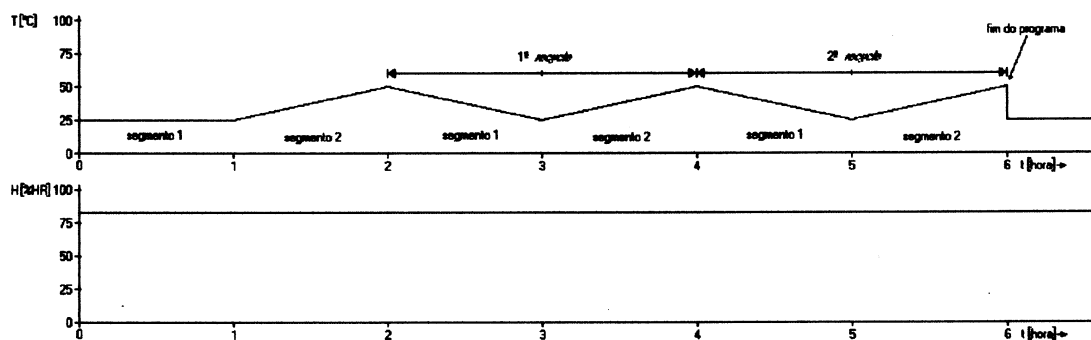


Figura 3.24 — Exemplo de um programa usando ciclos em segmentos.

A evolução da temperatura é sempre em rampa. A evolução da humidade relativa é também em rampa excepto quando, de um segmento para outro a humidade passa de *On* a *Off* ou vice-versa (no caso da humidade passar a *Off*, o controlo de humidade é desligado imediatamente; no caso da humidade passar a *On*, o controlo de humidade é ligado imediatamente sendo o *Set Point* da humidade o que está designado no segmento em execução).

No quadro de alarmes (Figura 3.25), são definidos os valores dos alarmes de temperatura e humidade relativa máximos (*High*), alarmes de temperatura e humidade relativa mínimos (*Low*) e alarme de banda (*Band*). *Alarm Buzzer Delay* define o tempo ao fim do qual uma situação de alarme gera um sinal sonoro. *Alarm Mute Time* define o tempo de silenciamento do alarme após pressão no botão *Mute*.

ALARMS		
Temperature Alarm	High	100.0 °C
	Low	-50.0 °C
	Band	OFF °C
Humidity Alarm	High	98.0 %RH
	Low	15.0 %RH
	Band	OFF %RH
Alarm Buzzer Delay		10 min
Alarm Mute Time		5 min

MUTE

△

ALARM TEST

EXIT

▽

ENTER

Figura 3.25 — Quadro de alarmes.

No quadro *Control Mode* é visualizado o estado do controlador, em *Manual* ou a executar um programa. No caso de execução de um programa este é identificado e indicado qual o segmento em execução. É no quadro *Control Mode* que é iniciado e/ou terminado um programa e onde se pode colocar um programa em espera (*Hold*). *Segment Time* permite a alteração do tempo que falta para terminar o segmento em execução. Se um programa estiver em *Pg_End* (*Program End*), o *Set Point* da câmara é o que estiver definido no segmento 0. Para que o *Set Point* da câmara seja o que se encontra definido no modo *Manual* é necessário colocar o programa em *Stop*.

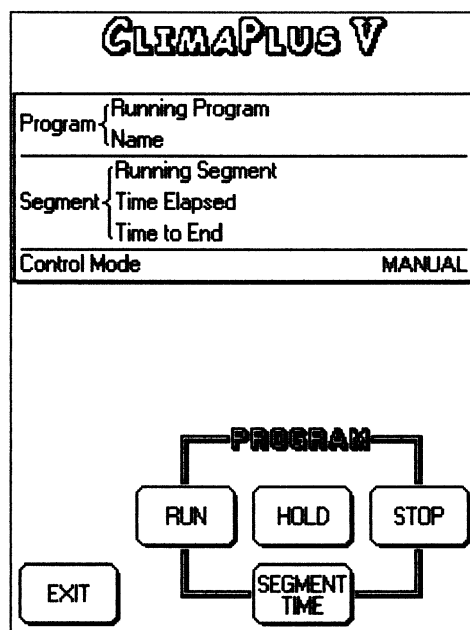


Figura 3.26 — Quadro *Control Mode*.

O pacote *FitoLog 5.0* é um conjunto de três aplicações destinadas a monitorizar e a registar dados de variáveis de processo de câmaras climáticas *FitoClima*, e é composto por:

- ***FitoLog***: aplicação que permite:
 - Visualizar e registar dados de variáveis de processo e respectivos *Set Points* e o estado de eventos, bem como informações de controlo. O registo de dados é efectuado para um ficheiro com um intervalo de tempo predeterminado (*Data Logging*);
 - Visualizar o estado do controlador (programa em execução, indicando o número do programa e do segmento).
- ***FitoView***: aplicação que permite:
 - Visualizar e/ou apagar ficheiros de registo executados pela aplicação *FitoLog*;
 - Imprimir os dados do registo;
 - Exportar os dados do registo para ficheiros de texto para possível manipulação noutros programas (Microsoft Excel, etc.).
- ***FitoProgram***: aplicação que permite:
 - Construção e visualização de programas;

— Envio de programas para o controlador da câmara climática.

A aplicação *FitoLog* é constituída por uma coluna situada normalmente à esquerda onde se monitorizam as diversas variáveis de processo e respectivos *Set Points*, o estado do evento, o estado do programa eventualmente em execução e o estado do registo de dados (*DataLog Off* ou *DataLog On* com indicação do numero de amostras efectuadas e a data e hora da próxima amostragem).

A aplicação *FitoLog* apresenta ainda uma barra de ferramentas onde estão incluídos os botões que activam quadros de diálogo com funcionalidades específicas (Figura 3.27).



Figura 3.27 — Barra de ferramentas da aplicação *FitoLog*.



Torna activo o quadro de diálogo *Graph* onde se visualizam graficamente os últimos registos efectuados.



Torna activo o quadro de diálogo *Configuration Setup* onde se pode alterar o nome das variáveis de processo e respectivos *Set points*, o nome dos eventos bem como as unidades de medida e cores para representação dos dados e alterar os parâmetros da comunicação com a câmara climática (seleccionar a porta de comunicação do computador).



Torna activo o quadro de diálogo *Data Log* onde se pode iniciar ou terminar um registo de dados.



Torna activo o quadro de diálogo *Programs* onde se podem programar e visualizar ciclos de execução automática.



Procedimento de segurança que permite ao utilizador o controlo do *Data Logging* através de *Password*.



Termina o *FitoLog* sendo apenas possível se a aplicação tiver sido desbloqueada através da *Password*.



Visualização do estado do processo de registo de dados e eventuais erros de comunicação com a câmara climática.

No quadro de diálogo *Configuration Setup* (Figura 3.28) é possível alterar o seguinte:

- O nome da variável de cada canal bem como a unidade de medida e cor de representação (o canal par é o *Set Point* do canal anterior);
- O tipo de câmara e de controlador;
- A porta de comunicação que o computador irá utilizar.

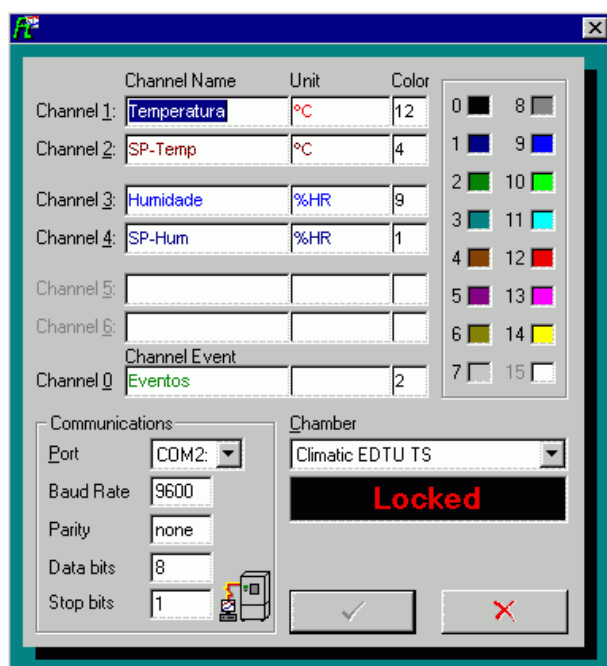



Figura 3.28 — Quadro de diálogo *Configuration Setup* da aplicação *FitoLog*.

Pressionando o botão  ou através do botão direito do rato, acede-se ao quadro de diálogo *Graph* (Figura 3.29) para alteração de parâmetros do gráfico, nomeadamente, escolha de dados a visualizar, escalas de visualização e gráfico com ou sem grelha de orientação.

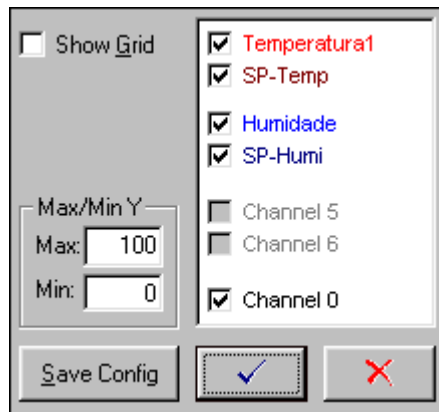


Figura 3.29 — Quadro de diálogo *Graph* da aplicação *FitoLog*.

Para iniciar o processo de registo de dados, deve preencher-se o nome do ficheiro onde serão guardados os dados e o tempo de amostragem, no quadro de diálogo *DataLog*, seguido-se a selecção do botão *Start Logging*. (Figura 3.30).

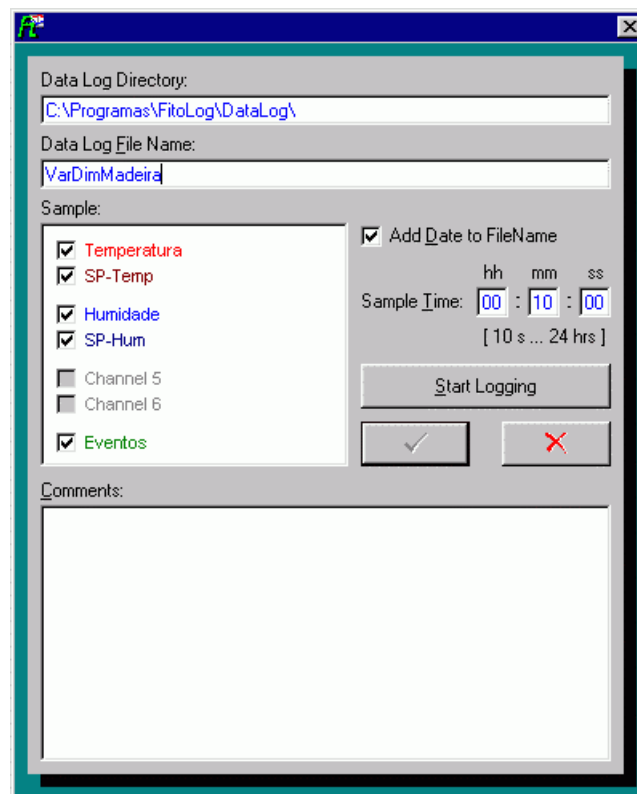




Figura 3.30 — Quadro de diálogo *DataLog* da aplicação *FitoLog*.

A aplicação *FitoProgram* permite a construção de programas para controlar câmaras climáticas *FitoClima*. O menu *File* permite criar novos programas com o comando *New Program* e permite abrir e alterar programas guardados no computador através do comando *Open Program*. Pode ainda enviar-se um programa para a câmara climática através do comando *Send Program to Controller* no menu *Options*.

O programa em construção e/ou alteração pode ser graficamente visualizado acedendo ao menu *Options* e escolhendo o comando *Show Graph*, ou pressionando o seguinte botão . No quadro de diálogo de visualização o botão  permite o acesso à configuração de variáveis a visualizar e o limite temporal da visualização (Figura 3.31).

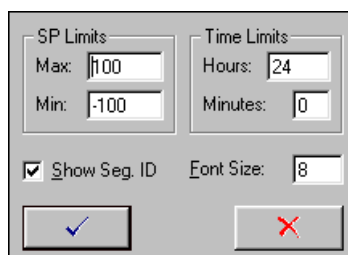

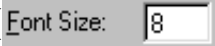


Figura 3.31 — Quadro de diálogo *Graph Options* da aplicação *FitoProgram*.

A caixa  *Show Seg. ID* permite a visualização ou não do número do segmento no gráfico. A caixa *Font Size* () permite alterar a dimensão dos caracteres que representam o número do segmento.

Apresenta-se na Figura 3.32 um exemplo do programa utilizado nos ensaios da variação dimensional de provetes de madeira.

Sabendo, à partida, quais os patamares de humidade relativa a usar, a única incógnita foi a duração de cada patamar, a qual foi encontrada após o primeiro passo de estabilização da madeira a 35 % de humidade relativa. Definiu-se, assim, que ao fim de 60 dias a madeira teria estabilizado para a humidade relativa da câmara. No entanto, o critério adoptado não foi exactamente este, mas o que se descreveu no Capítulo 4.

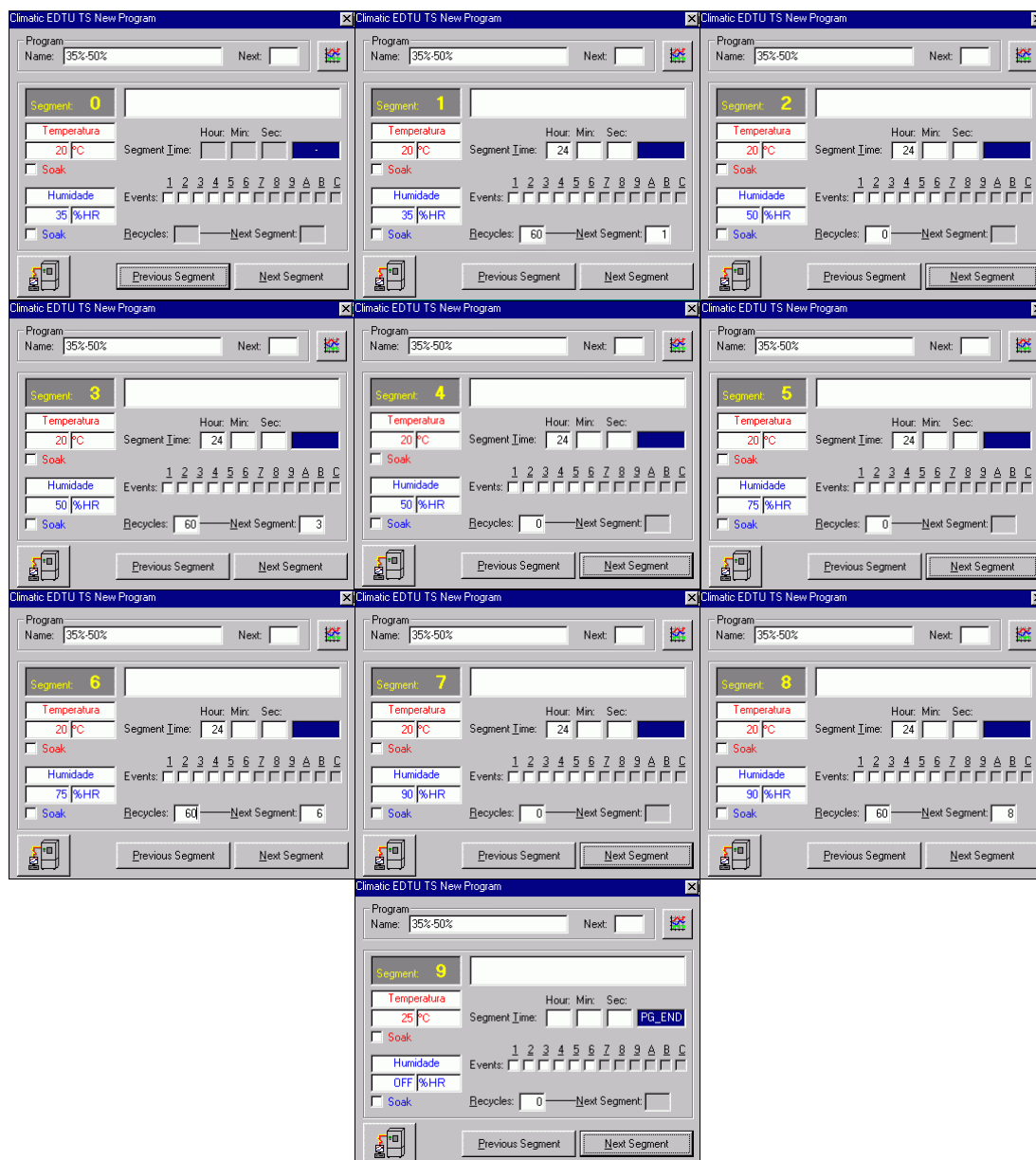


Figura 3.32 — Sequência de quadros de diálogo na construção de um programa com a aplicação *FitoProgram*.

Deu-se um nome ao programa e preencheram-se os quadros de diálogo de cada segmento. O segmento 0 é o de arranque a 20 °C e 35 % de humidade relativa. O segmento 1, com a duração de 24 horas é repetido 60 vezes totalizando 60 dias, representa o primeiro patamar de humidade relativa. O segmento 2, com a duração de 24 horas, é a transição entre os patamares de 35 % para 50 % de humidade relativa. Este segmento é importante uma vez que a câmara climática não consegue responder imediatamente às alterações

dá-las), é absolutamente necessário seleccionar um sensor adequado (*Select sensors*) do menu de configuração (*Setup*).

A selecção é globalmente válida, isto é, não se pode usar escalas diferentes ao mesmo tempo no mesmo canal, como por exemplo, medir a temperatura a resoluções diferentes.

Uma vez feita a selecção preliminar, os valores podem ser conferidos para serem aceites no procedimento de medição.

Na Figura 3.34 pode observar-se que um vasto número de sensores/escalas (127) estão condensados em 17 grupos. Os sensores/escalas estão distintamente numerados e estes números são os mesmos em comandos de controlo remoto. O agrupamento está definido para tornar mais fácil a selecção dos sensores da lista. Podem usar-se as setas para cima e para baixo para percorrer a lista completa de escalas. Se uma posição na lista estiver vazia, quer dizer que esse sensor não pode ser seleccionado nesse canal particular.

Por canal, existe precisamente uma entrada livre para um sensor definível pelo utilizador. Esta entrada é sempre a posição 126 da lista e não pode ser apagada.

Os sensores adquiridos pelo LFC podem funcionar tanto em corrente alternada como contínua e apresentam uma voltagem de excitação entre 1,5 V e 10 V. Na Figura 3.34 pode observar-se a sequência de menus apresentados para selecção dos sensores de voltagem. A voltagem a escolher poderá ser uma das posições 5, 6 ou 7 ($U_{2.5V}$, U_{5V} e U_{10V}).

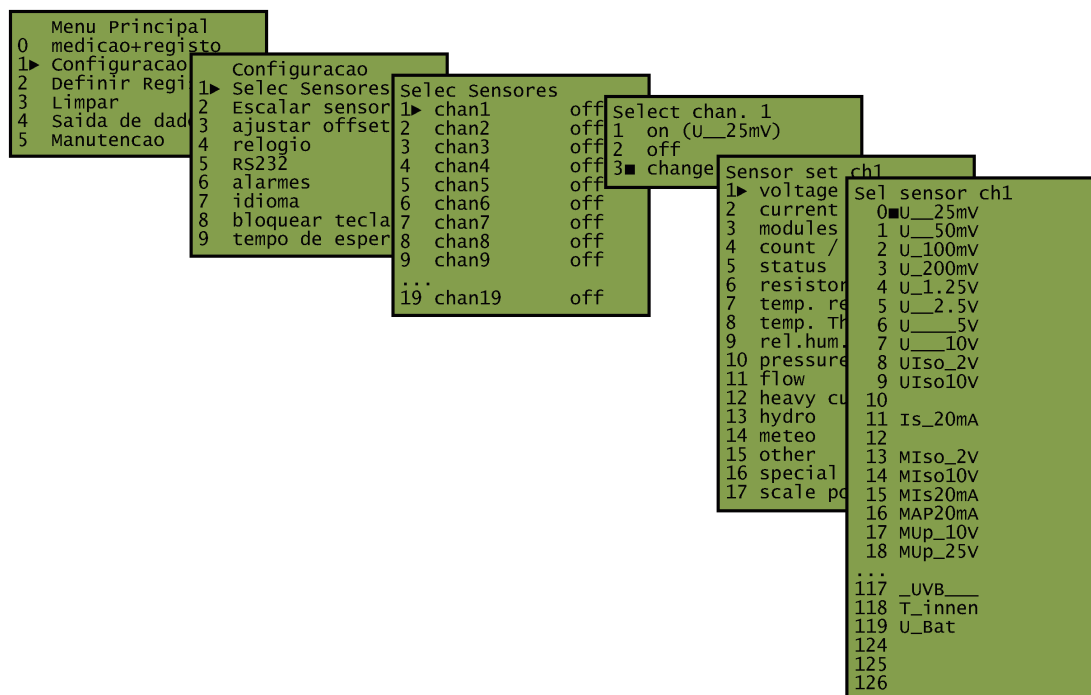


Figura 3.34 — Sequência de menus apresentados pelo *data logger* para a configuração dos sensores.

Capítulo 4

Medição da Variação Dimensional da Madeira

4.1 Objecto do Estudo Experimental

A componente experimental do presente estudo foi iniciada após desenvolvimento do protótipo e da obtenção dos provetes de madeira.

Foram ensaiados dois provetes análogos de madeira de carvalho, cujo comportamento à retracção é já bem conhecido, apresentando-se como uma madeira nervosa. Actualmente, sendo a madeira de carvalho uma das essências mais usadas em revestimentos de pavimentos, pretendeu-se avaliar a sua variação dimensional, nomeadamente a expansão hídrica.

Os ensaios realizados permitiram determinar da variação dimensional, no sentido da expansão. Em anexo mostram-se valores, disponíveis na bibliografia, da retracção tangencial e da retracção radial de algumas madeiras comerciais. Foram também determinadas as curvas higroscópicas e as massas volúmicas dos dois provetes.

Como já referido no parágrafo 2.3.2.2, para a selecção das dimensões dos provetes foram seguidas as indicações constantes em [10] que propõe provetes com $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ e uma tolerância de $\pm 1\text{ mm}$. A menor dimensão corresponde à direcção axial, que apresenta valores da retracção menores, logo menos importantes.

Os provetes foram fornecidos por uma empresa de revestimentos de pavimentos em madeira, tendo as amostras dimensões de $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. A face com 30 mm de espessura correspondia à direcção tangencial.

4.2 Ensaios Realizados

4.2.1 Variação Dimensional

Na determinação da variação dimensional de provetes de madeira, foram utilizados os equipamentos referidos no Capítulo 3, nomeadamente, dois sensores LSC por provete, um na direcção tangencial e outro na direcção radial. Tendo em atenção que a direcção axial é menos deformável, optou-se por não se fazer o seu registo.

Na Figura 4.1 pode observar-se a sequência das medidas obtidas nos ensaios dos provetes, nas direcções tangencial e radial, em função variação da humidade relativa da câmara climática em três intervalos: [35;50] %, [50;75] % e [75;90] %.

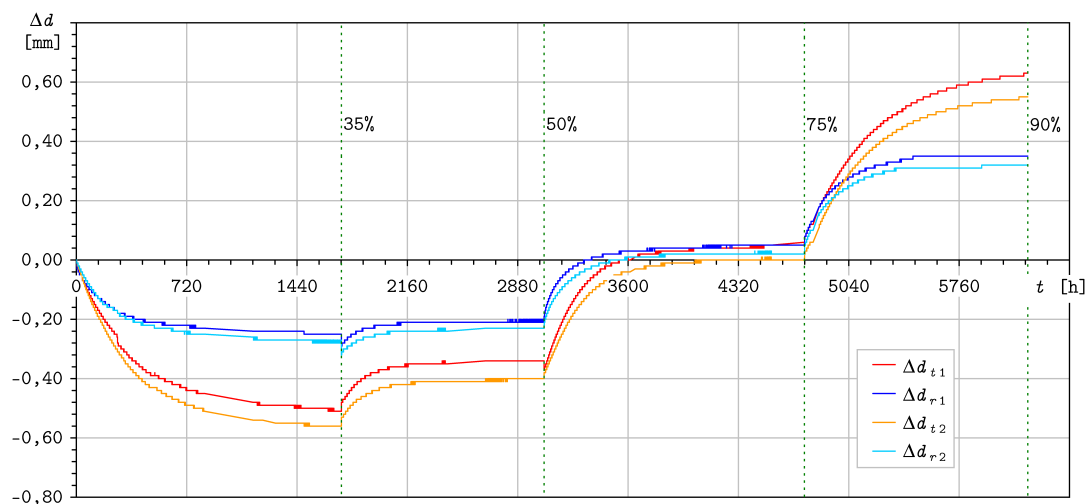


Figura 4.1 — Variação dimensional dos provetes nas direcções tangencial e radial para cada patamar de humidade relativa.

Iniciou-se o ensaio pela estabilização dos provetes para uma humidade relativa de 35 % e a uma temperatura de 20 °C. A curva representativa da variação dimensional até à estabilização a 35 % de humidade relativa pode ser observada na Figura 4.3.

O critério adoptado para se considerar que a madeira tinha atingido a estabilização foi a de se manter inalterável durante 5 dias consecutivos. Este

método é mais conservativo do que o definido pela norma EN 13009:2000 que define outro critério de paragem que consiste em aproximar a curva de regressão, por exemplo, a definida na página 89, que tem uma assíntota horizontal para a qual a variação dimensional irá estabilizar. A paragem pode então fazer-se quando se atingir 97 % do valor da assíntota.

Na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6 podem observar-se as curvas representativas da variação dimensional para cada intervalo de humidade relativa.

No início de cada ciclo, os provetes foram pesados e medidos nas três direcções, de modo a ser possível determinar, a curva higroscópica e a massa volúmica. Na Figura 4.2 apresentam-se os pontos de medição dos provetes: duas medições por face, nas direcções axial (A), radial (R) e tangencial (T).

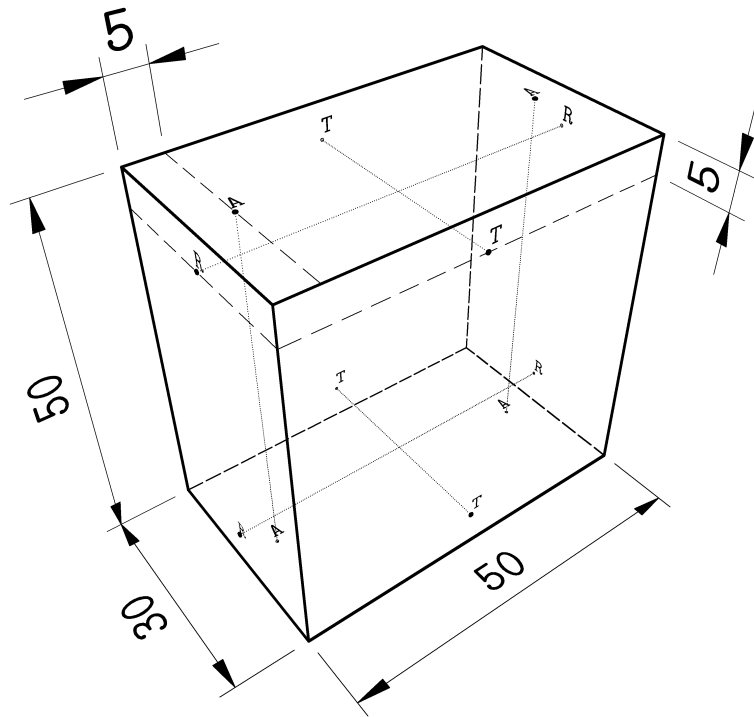


Figura 4.2 — Esquema de medição dos provetes.

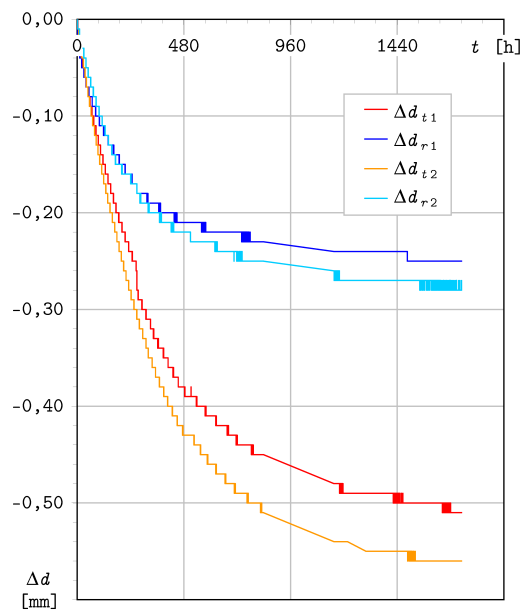


Figura 4.3 — Variação dimensional até à estabilização a 35 % de humidade relativa.

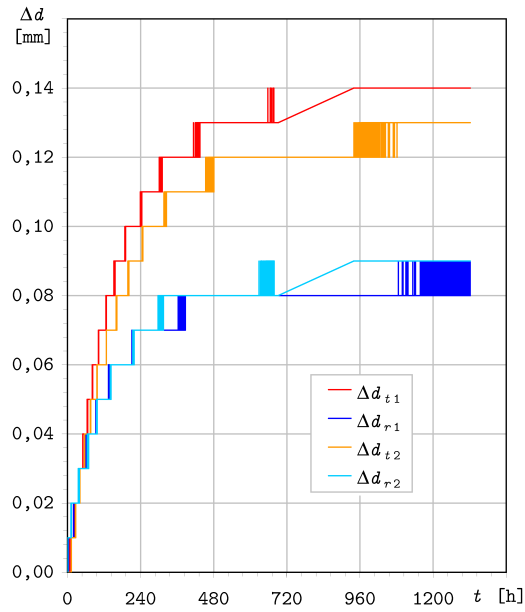


Figura 4.4 — Variação dimensional de 35 % a 50 % de humidade relativa.

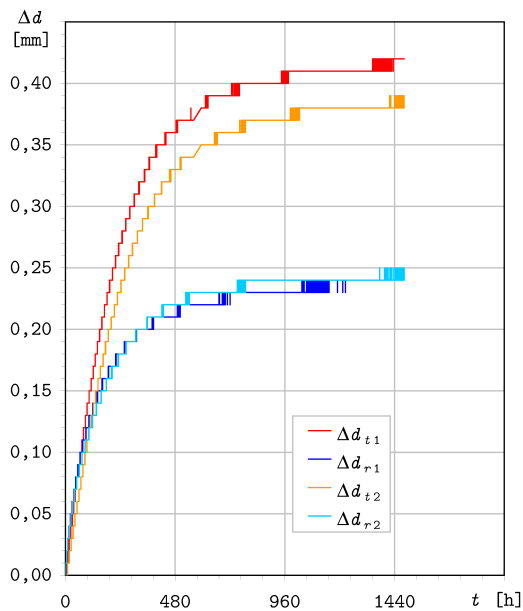


Figura 4.5 — Variação dimensional de 50 % a 75 % de humidade relativa.

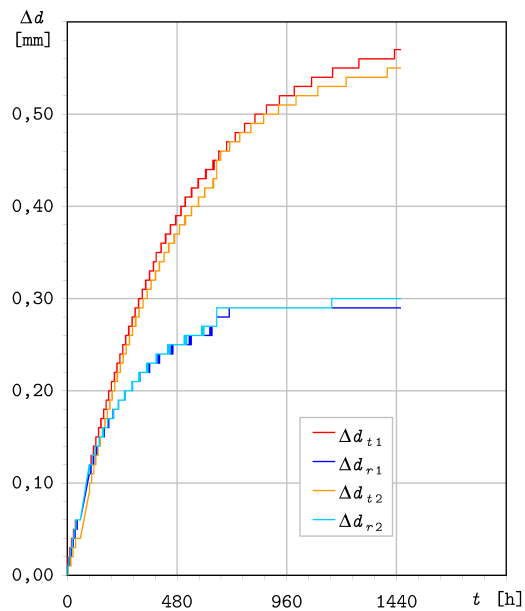


Figura 4.6 — Variação dimensional de 75 % a 90 % de humidade relativa.

A variação dimensional pode ser descrita por um modelo de regressão assintótico de dois parâmetros (*Rypstra* 1995).

Utilizou-se o método dos mínimos quadrados na aproximação de uma curva de regressão que apresentasse boa correlação para os intervalos de humidade relativa ensaiados. A aproximação usada para descrever a variação dimensional de madeira foi a seguinte [22]:

$$f(t) = y_{m\acute{a}x} [1 - e^{-kt}]$$

em que os coeficientes $y_{m\acute{a}x}$ e k são os parâmetros de ajuste, os valores de t foram substituídos por leituras aproximadamente equidistantes do tempo (em horas) e $f(t)$ foi substituída pelas leituras da variação dimensional (em milímetros). O parâmetro k representa a cinética da variação dimensional e a constante assintótica, $y_{m\acute{a}x}$, dada pelas dimensões em estado de equilíbrio higroscópico da madeira como uma assíntota. O modelo apresentado tem a vantagem de, com apenas dois parâmetros, conduzir a correlações acima de 98 % e, pelo facto de ser assintótico, poder prever-se qual o valor de $y_{m\acute{a}x}$ e ainda o tempo necessário para atingir 97 % do seu valor máximo como indicado em [21]:

$$\begin{aligned}\Delta d &= y_{m\acute{a}x} (1 - e^{-kt}) \\ \frac{\Delta d}{y_{m\acute{a}x}} &= 1 - e^{-kt} \\ 1 - \frac{\Delta d}{y_{m\acute{a}x}} &= e^{-kt}\end{aligned}$$

Se pretendermos parar o ensaio quando atingirmos 97 % do valor máximo da variação dimensional, isso significa que $\frac{\Delta d}{y_{m\acute{a}x}} = 0,97$, vindo a expressão:

$$\begin{aligned}0,03 &= e^{-kt} \\ \ln(0,03) &= -kt \\ t &= \frac{3,507}{k}\end{aligned}$$

Durante a realização do ensaio pode determinar-se por aproximação o coeficiente k , permitindo estimar-se, através da expressão anterior, o tempo necessário para atingir 97 % do valor máximo da variação dimensional.

A variação dimensional da madeira não é igual para cada intervalo de humidade relativa. A variação dimensional é maior para humidades relativas mais elevadas. Também foi notória a não linearidade no crescimento para um mesmo salto de humidade relativa. Estudos recentes [22] têm vindo a analisar este fenómeno designado por cinética de sorção e cinética da variação dimensional.

Na Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9 e na Figura 4.10 apresentam-se as curvas de aproximação para os patamares de humidade relativa de 50 %, 75 % e 90 %.

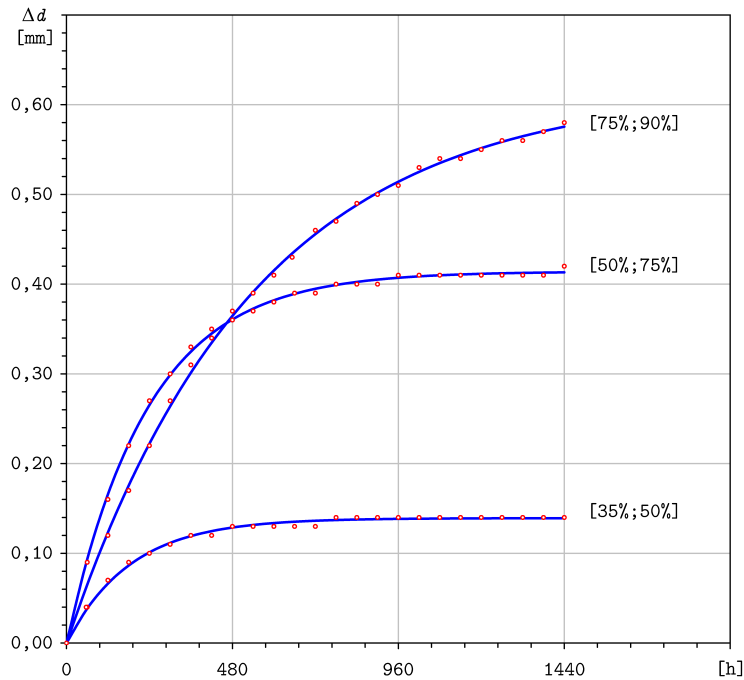


Figura 4.7 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção tangencial do provete 1.

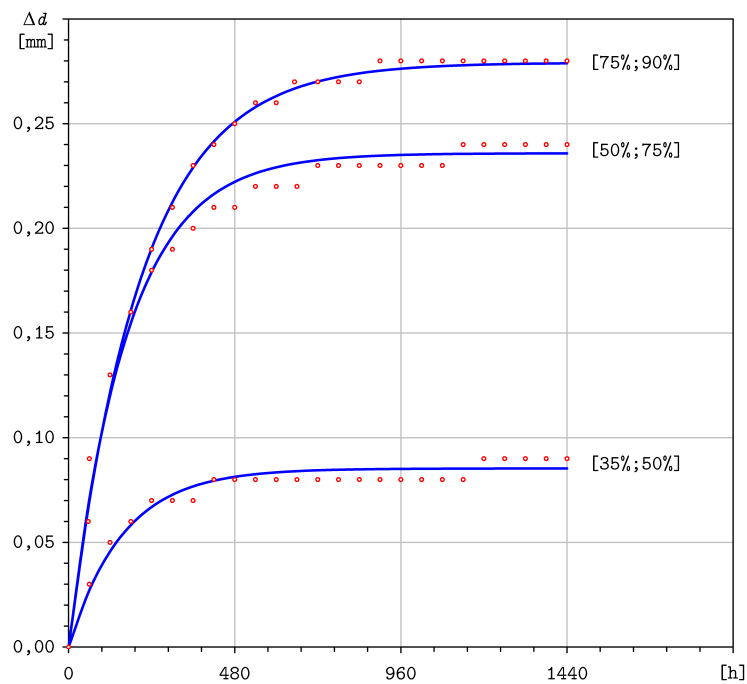


Figura 4.8 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção radial do provete 1.

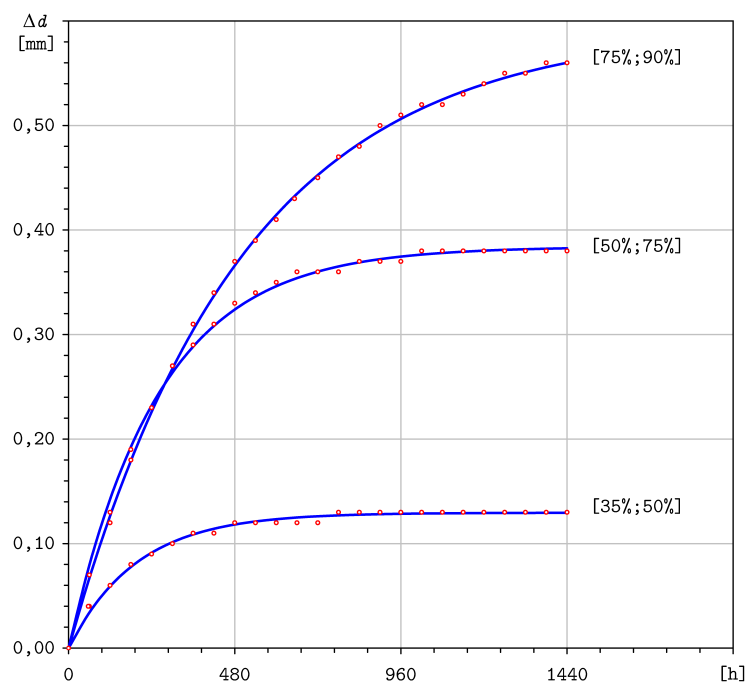


Figura 4.9 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção tangencial do provete 2.

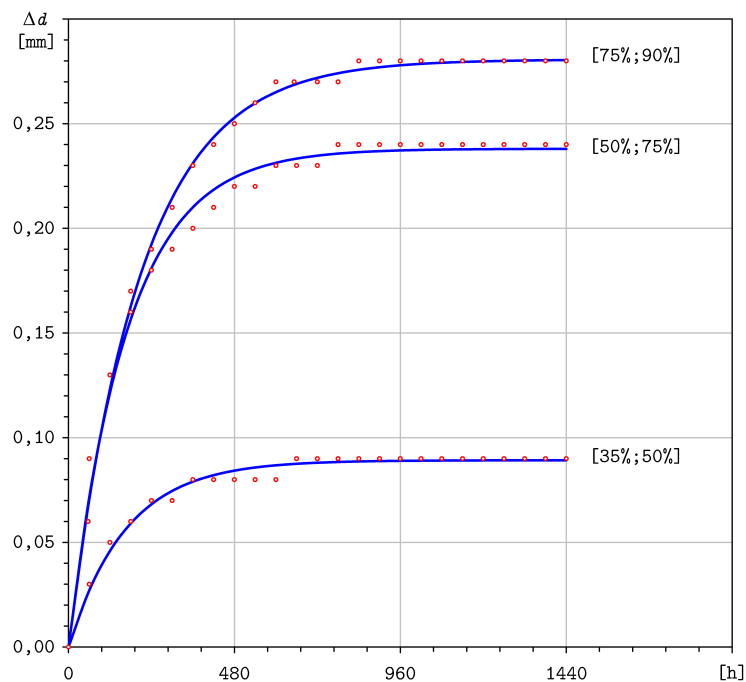


Figura 4.10 — Interpolação da variação dimensional em função do tempo e da humidade relativa na direcção radial do provete 2.

Apresenta-se na Tabela 4.1 os coeficientes das expressões de aproximação aos pontos experimentais e respectivos valores de correlação, bem como o módulo de desvio relativo médio. Relacionando os valores máximos $y_{m\acute{a}x}$ com os valores do gráfico da Figura 4.1, pode verificar-se que o critério de atingir 97 % da variação dimensional máxima definida na EN 13006:2000 foi também atingido.

Tabela 4.1 — Coeficientes das expressões de aproximação.

Direcção	Patamar	Provete 1				Provete 2			
		$y_{m\acute{a}x}$ [mm]	k [h ⁻¹]	R^2 [%]	E [%]	$y_{m\acute{a}x}$ [mm]	k [h ⁻¹]	R^2 [%]	E [%]
Tangencial	50 %	0,139 202	0,005 398	99,72	3,07	0,129 514	0,005 084	99,70	3,68
	75 %	0,414 053	0,004 265	99,95	1,67	0,383 988	0,003 865	99,92	2,67
	90 %	0,618 268	0,001 856	99,94	4,09	0,593 536	0,001 997	99,94	3,91
Radial	50 %	0,085 297	0,006 387	97,46	10,81	0,089 230	0,006 023	99,27	4,80
	75 %	0,235 862	0,005 935	99,22	7,32	0,238 020	0,005 949	99,52	4,81
	90 %	0,279 120	0,004 774	99,91	2,26	0,280 650	0,004 817	99,89	2,45

4.2.2 Determinação da Curva Higroscópica

O teor de humidade, ou teor em água como referido em [9], de um provete de madeira é o quociente, expresso em percentagem, da massa de água que se evapora do provete por secagem a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ até massa constante, pela massa do provete seco, segundo a expressão seguinte:

$$u = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

em que:

m_h — massa do provete húmido, expressa em gramas,

m_s — massa do provete seco, expressa em gramas.

Foram realizadas pesagens e medições dos comprimentos dos provetes antes do início do ensaio, no intervalo dos patamares de humidade relativa de 35 %, 50 %, 75 % e 90 % e após colocação dos provetes na estufa até estabilização da massa.

Na Tabela 4.2 apresentam-se as massas húmidas e secas e respectivo teor de humidade dos provetes em cada fase do ensaio.

Tabela 4.2 — Teor de humidade dos provetes.

Período	Provete 1			Provete 2		
	m_h (g)	m_s (g)	u (%)	m_h (g)	m_s (g)	u (%)
Início do ensaio	53,347	46,742	14,1%	53,576	46,746	14,6%
35 % HR	51,178	46,742	9,5%	51,173	46,746	9,5%
50 % HR	51,890	46,742	11,0%	51,899	46,746	11,0%
75 % HR	53,823	46,742	15,1%	53,848	46,746	15,2%
90 % HR	55,851	46,742	19,5%	55,817	46,746	19,4%

Na Figura 4.11 pode observar-se parte das curvas higroscópicas dos provetes ensaiados formadas apenas com os valores do teor de humidade supra determinados, verificando-se que os provetes apresentam curvas praticamente coincidentes. Apresentam-se também as equações das curvas de aproximação definidas no parágrafo 2.3.3.2 — Métodos de Ajuste a Curvas Higroscópicas.

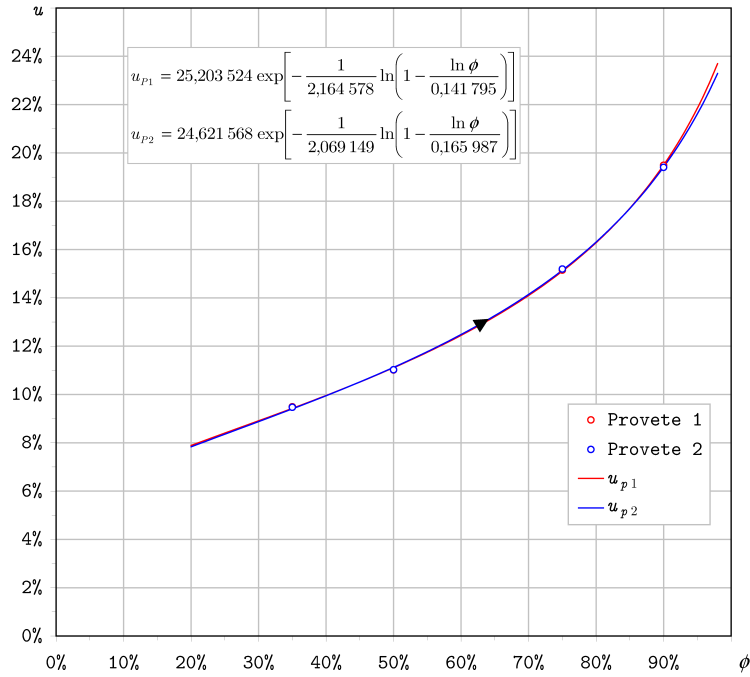


Figura 4.11 — Curvas higroscópicas dos provetes.

4.2.3 Determinação da Expansão Hígrica

Foi necessário fazer medições das dimensões dos provetes, segundo o esquema da Figura 4.2, antes do ensaio (seco ao ar), nos patamares de humidade relativa (35 %, 50 %, 75 % e 90 %) e após secagem em estufa.

A extensão hígrica (radial ou tangencial), expressa em percentagem, é:

$$(\varepsilon_h)_i = \frac{l_i - l_0}{l_0} \times 100$$

em que:

l_i — dimensão após medição do patamar i , numa dada direcção, expressa em milímetros,

l_0 — dimensão, numa dada direcção, do provete seco em estufa, expressa em milímetros.

O coeficiente de expansão hígrica (radial ou tangencial), expresso em percentagem, é:

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon_h}{\Delta u} \times 100$$

em que:

$\Delta \varepsilon_h$ — diferença de extensão hídrica entre dois patamares sucessivos, numa dada direcção;

Δu — diferença no teor de humidade de equilíbrio entre dois patamares sucessivos.

Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores das dimensões dos provetes em função da humidade relativa.

Tabela 4.3 — Dimensões dos provetes em função da humidade relativa.

Humidade Relativa	Provete 1		Provete 2	
	l_t (mm)	l_r (mm)	l_t (mm)	l_r (mm)
0 %	29,03	49,05	28,93	48,78
50 %	29,17	49,14	29,06	48,87
75 %	29,44	49,29	29,31	49,02
90 %	29,65	49,33	29,52	49,06

Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores da extensão hídrica e na Tabela 4.5 os valores do coeficiente de expansão hídrica dos provetes.

Tabela 4.4 — Extensão hídrica para os diferentes intervalos de humidade.

Humidade Relativa	Provete 1			Provete 2		
	u (%)	ε_t (%)	ε_r (%)	u (%)	ε_t (%)	ε_r (%)
50 %	11,0	0,48	0,17	11,0	0,45	0,18
75 %	15,1	1,43	0,48	15,1	1,33	0,49
90 %	19,5	2,13	0,57	19,4	2,05	0,58

Tabela 4.5 — Determinação do coeficiente de expansão hídrica.

Intervalo HR	Provete 1						Provete 2					
	Δu (%)	$\Delta \varepsilon_t$ (%)	$\Delta \varepsilon_r$ (%)	$\overline{\Delta u}$ (%)	$\alpha_{h\ t}$ (%)	$\alpha_{h\ r}$ (%)	Δu (%)	$\Delta \varepsilon_t$ (%)	$\Delta \varepsilon_r$ (%)	$\overline{\Delta u}$ (%)	$\alpha_{h\ t}$ (%)	$\alpha_{h\ r}$ (%)
[35;50] %	1,5	0,27	0,07	10,3	17,9	4,6	1,6	0,24	0,08	10,2	15,4	5,1
[50;75] %	4,1	0,95	0,31	13,1	22,9	7,4	4,2	0,88	0,31	13,1	21,1	7,3
[75;90] %	4,3	0,70	0,09	17,3	16,2	2,1	4,2	0,73	0,09	17,3	17,2	2,1

Apresenta-se na Figura 4.13 a variação da extensão hídrica ε_h , e do coeficiente de expansão hídrica α_h para as direcções tangencial e radial de cada provete.

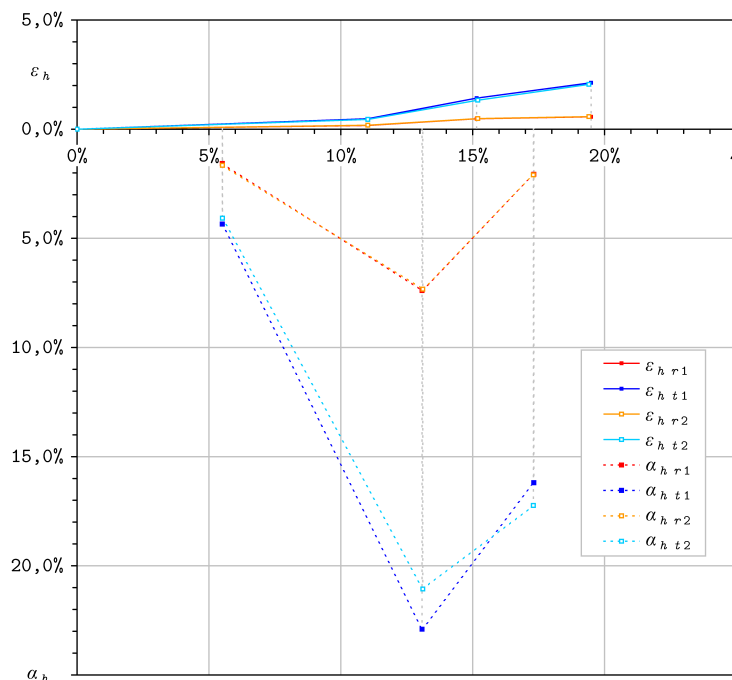


Figura 4.12 — Variação da extensão hídrica ε_h , e do coeficiente de expansão hídrica α_h .

O gráfico da Figura 4.12 mostra a curva da extensão hídrica acima do eixo das abcissas e abaixo desta está representada a curva do coeficiente de expansão hídrica.

As abcissas dos pontos do coeficiente de expansão hídrica são os teores de humidade médios entre dois patamares de humidade relativa sucessivos. Por exemplo, no intervalo de humidade relativa [75;90] %, cujos teores de humidade são respectivamente, 15,1 % e 19,5 %, no provete 1, a abcissa do coeficiente de expansão hídrica será 17,3 %.

Na Figura 4.13 estão representados, em escalas verticais independentes, as curvas da extensão hídrica e do coeficiente de expansão hídrica.

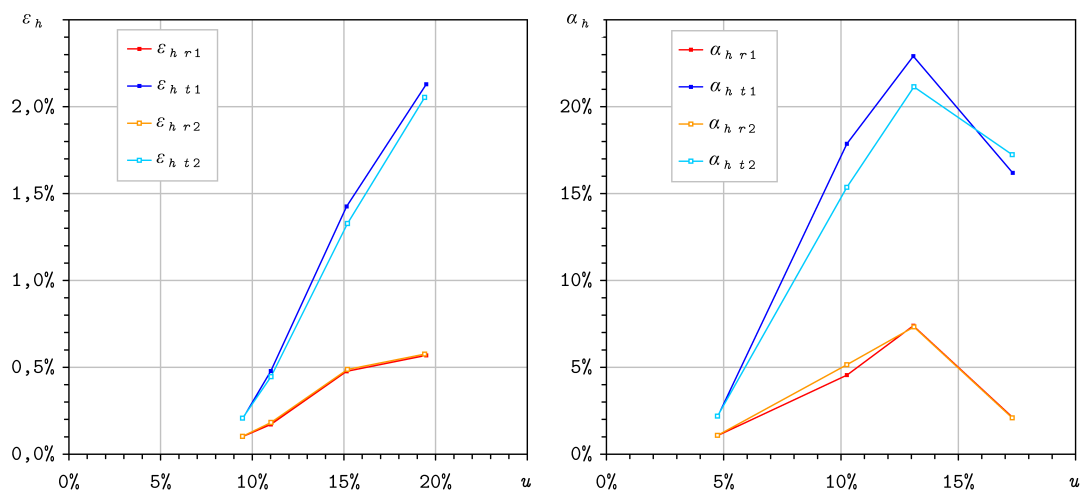


Figura 4.13 — Variação da extensão higríca ε_h , e do coeficiente de expansão higríca α_h .

Da análise dos gráficos da Figura 4.13 verifica-se que o coeficiente de expansão higríca é crescente e semelhante para os dois provetes, à excepção do último ponto que se apresenta inferior ao ponto que lhe antecede. Verifica-se nos dois provetes e para as duas direcções das fibras.

O facto deste fenómeno ter acontecido poderá ter várias causas, sendo a causa mais provável de não ter sido atingido o equilíbrio higroscópico no patamar dos 90 % e ter-se usado uma curva de aproximação que se esperava representativa o suficiente do fenómeno.

4.2.4 Determinação da Massa Volúmica

Para a determinação da massa volúmica de um provete, segundo as indicações constantes em [17], é necessário calcular o volume do provete por medição das suas arestas e a massa do provete por pesagem.

Para calcular a massa volúmica é necessário também o valor do teor de humidade, o coeficiente de retracção volumétrica e o teor de humidade de saturação das fibras do provete (este último teor apenas no caso de o teor de humidade do provete não lhe ser nitidamente inferior).

A massa volúmica a determinado teor de humidade, em gramas por centímetro cúbico, é:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

em que:

m_u — massa do provete, expressa em gramas,

V_u — volume do provete, expresso em centímetros cúbicos.

A massa volúmica de referência (12 %), em gramas por centímetro cúbico, é:

$$\rho_{12} = \rho_u \frac{(100 + 12) (100 + \alpha_v u)}{(100 + u) (100 + 12 \alpha_v)}$$

em que:

u — teor de humidade do provete, expresso em percentagem,

α_v — coeficiente de retracção volumétrica do provete, expresso em percentagem,

Na Tabela 4.6 apresentam-se os valores da massa volúmica e da massa volúmica de referência dos provetes, podendo observar-se os resultados nos gráficos da Figura 4.14.

Tabela 4.6 — Massa volúmica e massa volúmica de referência dos provetes.

Período	Provete 1		Provete 2	
	ρ (g/cm ³)	ρ_{12} (g/cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ_{12} (g/cm ³)
Início do ensaio	0,711	0,758	0,721	0,772
35 % HR	0,698	0,744	0,703	0,753
50 % HR	0,704	0,750	0,710	0,760
75 % HR	0,713	0,760	0,717	0,768
90 % HR	0,726	0,773	0,729	0,780

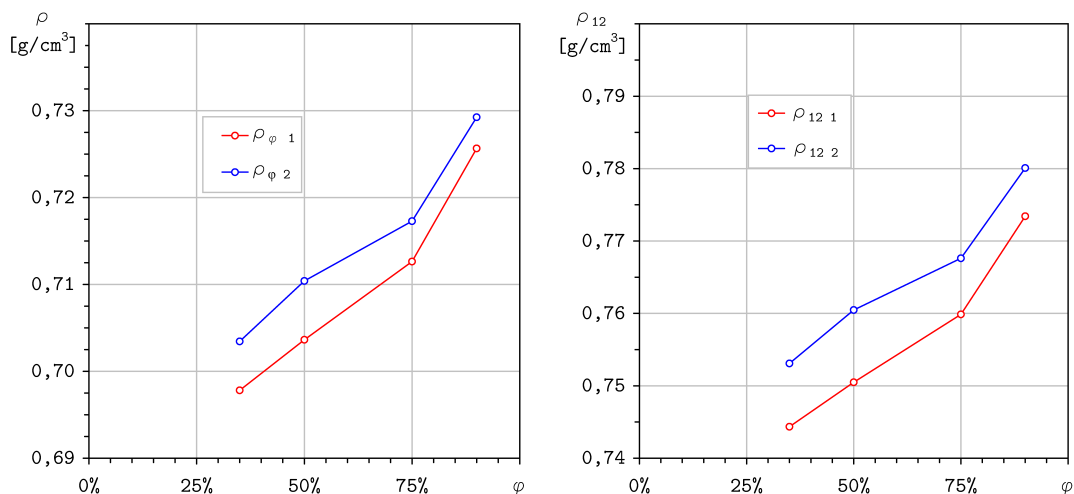


Figura 4.14 — Massa volúmica e massa volúmica de referência dos provetes.

As massas volúmicas aumentam com a humidade relativa, significando pois que a relação entre a massa e o volume dos provetes é crescente. Ambos os provetes apresentam pequeno desvio de valores.

Na determinação da massa volúmica de referência foi necessário determinar o volume e o coeficiente de retracção volumétrica. Os três lados dos provetes foram medidos entre patamares de humidade relativa como indicado na Figura 4.2.

4.2.5 Relação entre Variação Dimensional, Humidade Relativa e Teor de Humidade

Nas subsecções anteriores determinaram-se, de forma independente, vários parâmetros caracterizadores da madeira em estudo. Pretende-se nesta subsecção mostrar como se podem relacionar os três parâmetros fundamentais do fenómeno da variação dimensional, que são as extensões hígricas, a humidade relativa do ambiente e o teor de humidade da madeira.

Na Figura 4.15 apresenta-se um ábaco com a representação conjunta daqueles parâmetros, optando-se por simplificar os valores das extensões por uma curva que passa pelos pontos médios dos valores obtidos para os dois provetes. As curvas higroscópicas dos dois provetes também foram substituídas por apenas uma curva higroscópica média.

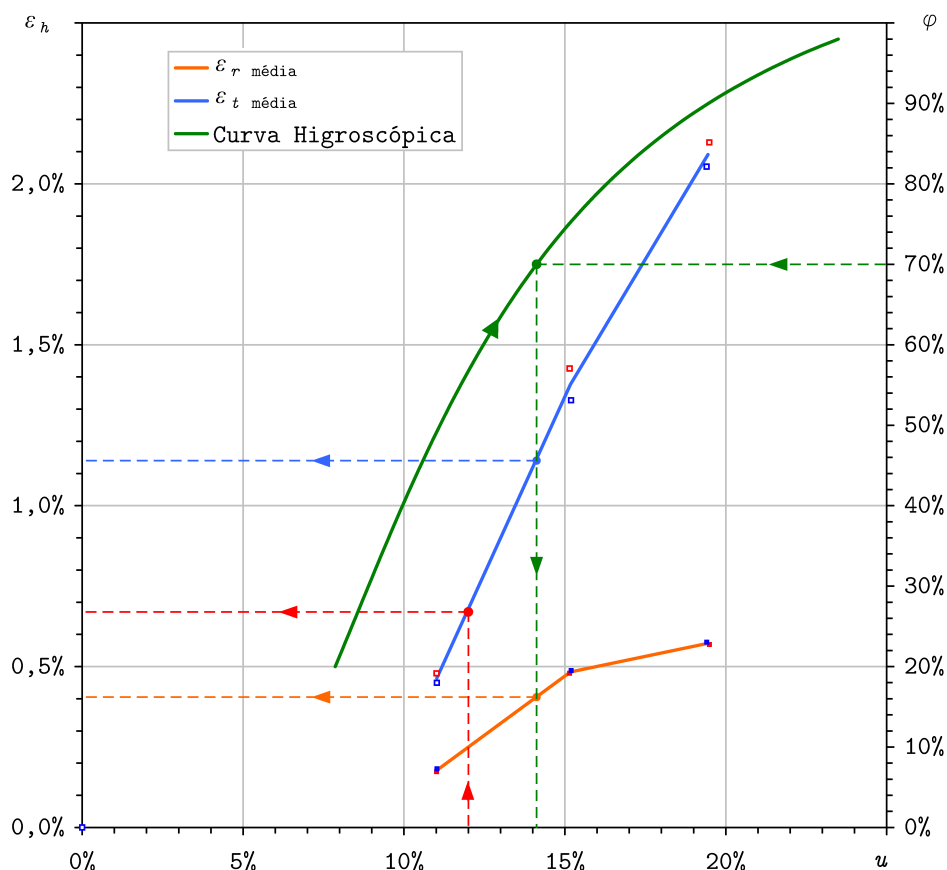


Figura 4.15 — Representação conjunta das extensões hígricas em função da humidade relativa e do teor de humidade.

Se se conhecer a humidade relativa ambiente a que a madeira irá estar sujeita, por exemplo $\varphi = 70 \%$ e entrando no ábaco na escala vertical direita com esse valor até encontrar a curva higroscópica obtém-se, em abcissas, o provável teor de humidade u , com cerca de 14 %.

Com o valor do teor de humidade, e percorrendo o ábaco na vertical, encontram-se as curvas das extensões hígricas, primeiro na direcção radial e depois na direcção tangencial. Na escala vertical esquerda retiram-se os valores 0,4 % e de 1,15 % de extensão hígrica radial e tangencial, respectivamente.

Se os elementos de madeira de carvalho do exemplo anterior tiverem uma largura de 100 mm na direcção tangencial, e tendo sido adquiridos com um teor de humidade de 12 %, correspondendo a uma extensão de 0,7 %, prova-

velmente a sua largura irá aumentar cerca de 0,45 mm ($100 \text{ mm} \times (1,15 \% - 0,7 \%)$).

Este procedimento só é válido nas situações em que haja aumento do teor de humidade da madeira do estado higroscópico inicial para o estado higroscópico final.

4.3 Análise dos Resultados Obtidos

Neste capítulo, procurou analisar-se a variação dimensional no sentido das expansões de provetes de madeira de carvalho, em três patamares de humidade relativa ambiente, que serviram de base da interpolação para outros valores de humidade relativa e caracterizaram-se os teores de humidade dos provetes para os referidos patamares de humidade relativa conseguindo-se definir parte da curva higroscópica da madeira de carvalho.

Na determinação dos parâmetros da extensão hídrica e do coeficiente de expansão hídrica, tomou-se como referência o princípio de cálculo definido na norma EN 13009:2000 [21]. Outros parâmetros necessários seguiram o princípio definido na norma NP-615:1973 [10] para a retracção.

A massa volúmica é um parâmetro que depende naturalmente do aumento do teor de humidade, apresentando desde logo alguma importância na caracterização da madeira, podendo então relacionar-se com a variação dimensional. Determinou-se também a massa volúmica de referência a 12 % de teor de humidade verificando-se uma certa linearidade crescente com a humidade relativa.

Foi possível construir um ábaco que relaciona três parâmetros fundamentais: a variação dimensional com a humidade relativa e o respectivo teor de humidade do provete. Com este ábaco é fácil prever, para uma dada humidade relativa ambiente, um intervalo para a extensão hídrica tangencial e radial, bem como retirar o valor do teor de humidade da madeira.

De forma análoga é possível obter-se um ábaco que relaciona os parâmetros anteriores com o coeficiente de expansão hídrica.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Considerações Finais

Ao concluir este trabalho, consideramos que os objectivos fundamentais que nos propusemos tratar foram atingidos, pese embora a dificuldade sentida na complexidade da conjugação dos muitos factores que influenciam o fenómeno em estudo, no espaço temporal deste trabalho, para que se possa chegar a resultados caracterizadores de um material.

Será de salientar o facto do presente estudo se direccionar para o melhor conhecimento da variação dimensional dos materiais que constituem os revestimentos interiores das paredes, tectos e pavimentos face à variação da humidade relativa interior.

5.2 Síntese Crítica dos Resultados

Na sequência dos estudos efectuados poderemos apontar as seguintes conclusões como as mais significativas do comportamento da madeira face à humidade:

- A retracção da madeira é um fenómeno já bastante conhecido por parte da indústria de extracção e de transformação, uma vez que as deformações dependerem dos cortes de pranchas no estado verde;
- A retracção é normalmente referenciada como a variação dimensional de diminuição das dimensões de um provete desde o estado verde até ao estado comercialmente seco, isto é, cujo teor de humidade é de cerca de 12 %;

- Os manuais de referência apresentam normalmente os valores totais da retracção tangencial, da retracção radial e da retracção volumétrica. A retracção axial é na maioria das vezes desprezada, sendo da ordem de 10 % dos valores da retracção tangencial;
- A retracção é de fácil determinação apresentando uma linearidade com o teor de humidade da madeira. Abaixo do teor de humidade de saturação das fibras, a retracção da madeira é muito mais acentuada do que acima daquele valor;
- A expansão higríca, de determinação mais elaborada e demorada, exigindo equipamentos de precisão dispendiosos, é uma propriedade fundamental na caracterização do comportamento da madeira em serviço;
- Em oposição à retracção, são poucas as referências que disponibilizam a informação sobre os valores da expansão higríca. Algumas delas apresentam apenas valores totais entre o estado seco e o estado saturado, não sendo conhecido o comportamento da madeira nos estados higroscópicos intermédios;
- Neste estudo desenvolveu-se um protótipo para determinação da expansão higríca, que corresponde às exigências normativas;
- Foram estudados provetes de madeira de carvalho para três intervalos de humidade relativa ambiente: [35;50] %, [50;75] % e [75;90] %;
- A expansão higríca apresenta-se linear em função do teor de humidade do material ensaiado obtendo-se valores semelhantes nos dois provetes testados;
- Foi também determinada a curva higroscópica e a massa volúmica dos provetes, uma vez que a primeira é uma propriedade fundamental na caracterização do comportamento dos materiais face à humidade e a segunda apresenta-se como uma propriedade que tem influência no comportamento dos materiais;

- Definiu-se um ábaco que permite prever a expansão hídrica de revestimentos em madeira maciça no caso em que se conheça a variação do teor de humidade do material.

5.3 Desenvolvimento Futuro da Investigação neste Domínio

A humidade constitui uma das causas principais das patologias observadas nos edifícios. O presente trabalho dá uma contribuição para o estudo e interpretação da variação dimensional da madeira maciça, embora convenha sublinhar que existe ainda um vasto campo de investigação neste domínio.

No que se refere à investigação fundamental, consideramos importante desenvolver os seguintes aspectos:

- Apesar da retracção estar catalogada para grande parte das espécies de madeira, é necessária a determinação da expansão hídrica e sua disponibilização em manuais de referência, só possível através da complementaridade de vários laboratórios e de projectos de investigação;
- O conhecimento da expansão hídrica da madeira ajuda a prever o seu comportamento futuro face a acções da humidade;
- A disponibilização de um catálogo com valores da expansão hídrica, não só da madeira, mas de outros materiais de construção, é sem dúvida uma tarefa para futura investigação neste domínio.

Referências Bibliográficas

- [1] Hiziroglu, Salim. *F-5009 – Dimensional Changes in Wood*. Oklahoma State University (OSU). Division of Agricultural Sciences and Natural Resources.
<http://pearl.agcomm.okstate.edu/forestry/general/f-5009.pdf>.
- [2] Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ficha M9 – *Humidade da madeira*. LNEC 1997
- [3] International Standard ISO 10545-8:1996. *Ceramic tiles – Part 8: Determination of linear thermal expansion*.
- [4] *Memosol. Mémento d'héliotechnique*. Éditions Européennes Thermique et Industrie (EETI), 1979. ISBN 2-85933-006-2.
- [5] Carvalho, Albino de. *Madeiras Portuguesas. Estrutura anatómica. Propriedades. Utilizações*. Vol. I, Instituto Florestal, 1996.
- [6] Chapelet, Josette; Dirol, Danièle; Ozanne, Gérald; Rayzal, Michel e Serment, Marie-Madeleine. *Bois: Mode d'emploi et préservation*. Département Biologie – Environnement – Technologies. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement – CTBA, Décembre 1991, ISBN 2-85684-007-8.
- [7] NP EN 322:2002. *Placas de derivados de madeira – Determinação do teor de água*.
- [8] International Standard ISO 3130:1975. *Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests*.
- [9] NP-614:1973. *Madeiras – Determinação do teor em água*.

- [10] NP-615:1973. *Madeiras – Determinação da retracção.*
- [11] Hansen, Kurt. *Sorption isotherms – A catalogue.* Technical report 162/86. Building Materials Laboratory. The Technical University of Denmark. December 1986.
- [12] International Standard ISO 12571:2000. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of hygroscopic sorption properties.*
- [13] American Society of testing Materials. *Standard guide for moisture conditioning of wood and wood-based materials.* Annual Book of ASTM Standards D 4933. Vol. 4.10. Philadelphia, PA 1997.
- [14] WoodBin. *Computing moisture content of wood.*
<http://www.woodbin.com/ref/wood/emc.htm>. Setembro 2004.
- [15] *Equilibrium moisture content (EMC).*
<http://legacy.ncsu.edu/classes/wps203001/online/EMC.htm>.
- [16] NP EN 323:2003. *Placas de derivados de madeira – Determinação da massa volúmica.*
- [17] NP-616:1973. *Madeiras – Determinação da massa volúmica.*
- [18] WoodBin. *Wood shrinkage explained.*
<http://www.woodbin.com/ref/wood/shrinkage.htm>. Setembro 2004.
- [19] *Shrinkage (s) and swelling (s)* em http://legacy.ncsu.edu/classes/wps203001/online/shrinkage_swell.htm. Setembro 2004.
- [20] Freitas, V. P de. *Transferência de humidade em paredes de edifícios – Análise do fenómeno de interface.* Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto 1992.
- [21] EN 13009:2000. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determinatin of hygric expansion coefficient.*
- [22] Meijer, M. de e Militz, H. *Moisture transport in coated wood. Part 2: Influence of coating type, film thickness, wood species, temperature and*

- moisture gradient on kinetics of sorption and dimensional change.* Holz Roh – Werkstoff 58 (2001) pp. 467-475. Springer-Verlag 2001.
- [23] Latta, J. K. *Water and building materials.* CBD-30. Canadian Building Digest, June 1962.
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd030e.html>. Setembro 2004.
- [24] Militz, Holger e Tjeerdsma, Boke. *Heat treatment of wood by the PLATO-process.*
- [25] Machado, José Saporiti. *Madeiras Folhosas e Resinosas. Nomenclatura Comercial.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ICT Informação Técnica Estruturas ITES 11, 1996.
- [26] American Society of testing Materials. *Standard methods of testing small clear specimens of timber.* Annual Book of ASTM Standards D 143. Vol. 4.10. Philadelphia, PA 1997.
- [27] Carvalho, Albino de. *Madeiras Portuguesas. Estrutura anatómica. Propriedades. Utilizações.* Vol. II, Direcção-Geral das Florestas, 1997.
- [28] Badger Pond Woodworking. *Wood Shrinkage Values.*
http://www.wwforum.com/faqs_articles/woodmove.html. Consultado em Junho 2002.
- [29] WoodBin. *Wood Shrinkage Table.*
http://www.woodbin.com/ref/wood/shrink_table.htm. Consultado em Junho 2002.
- [30] American Society of testing Materials. *Standard nomenclature of domestic hardwoods and softwoods.* Annual Book of ASTM Standard D 1165. Vol. 4.10. Philadelphia, PA 1997.

Bibliografia

Bibliografia

Aicher, Simon; Dill-Langer, Gerhard e Höfflin, Lilian. *Effect of Polar Anisotropy of Wood Loaded Perpendicular to Grain*. Journal of Materials in Civil Engineering, Jan./Feb 2001.

Aléon, Daniel e Perez, Jean. *Guide Pratique de la Mesure d'Humidité du Bois*. Centre Technique du Bois et d'Ameublement, mai 2000.

Aléon, Daniel; Chanrion, Pratrice; Négrie, Gilles; Perez, Jean e Snieg, Olek. *Séchage du Bois. Guide Pratique*. Centre Technique du Bois et d'Ameublement, 2001.

American Society of testing Materials. Appendix X.1 – *Dimensional changes in lumber with moisture content*. Annual Book of ASTM Standards D 1990. Vol. 4.10. Philadelphia, PA 1997.

American Society of testing Materials. *Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials*. Annual Book of ASTM Standards D 2395. Vol. 4.10. Philadelphia, PA 1997.

American Society of testing Materials. *Standard practice for use of International System of Units (SI)*. Annual Book of ASTM Standards E 380. Vol. 4.10. Philadelphia, PA 1997.

Baker, M. C. *Thermal and moisture deformation in building materials*. CBD-56. Canadian Building Digest, August 1964.
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd056e.html>.

Benoit, Yves. *Le Guide des Essences de Bois. 61 Essences, les choisir, les reconnaître, les utiliser.* Éditions Eyrolles/Centre Technique du Bois et d'Ameublement, 2.nd édition, 2000.

Bentz, Dale P.; Garboczi, Edward J.; Quenard, Daniel A. *Modeling Drying Shrinkage in Reconstructed Porous Materials: Application to Porous Vycor Glass.* <http://ciks.nist.gov/garbocz/paper75/paper75.html>.

Brandt, E. e Hansen, M. Mjorslev. *Measuring Moisture in Wood with Built in Probes.*

Dickens, H. B. *Use of Wood in Construction.* CBD-88. Canadian Building Digest, April 1967. <http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd088e.html>.

Felman, R. F. *Volume change and creep of concrete.* CBD-119. Canadian Building Digest, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd119e.html>.

Manual de Instruções da câmara de ensaios climáticos Fitoclima 3600 EDTU.

Guzenda, Ryszard e Olek, Wieslaw. *Identification of Free and Bound Water Content in Wood by Means of NMR Relaxometry,*
<http://www.ndt.net/article/v06n03/guzenda/guzenda.htm>.

Hamilton, J. J. *Foundations on swelling or shrinking subsoil's.* CBD-184. Canadian Building Digest,
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd184e.html>.

Hamilton, J. J. *Swelling and shrinkage subsoils.* CBD-84. Canadian Building Digest, December 1966.
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd084e.html>.

Hansen, A. T. *Effects of Wood Shrinkage in Buildings.* CBD-244. Canadian Building Digest, February 1987.
<http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd244e.html>.

Hansen, A. T. *Moisture problems in houses.* CBD-231. Canadian Building Digest, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd231e.html>.

Hard Wood Floor's Acclimation, Material Storing, *Loading and Hard Wood Flooring Products at the Jobsite.*
<http://www.woodfloorsonline.com/techtalk/woodwater3.html>.

How Moisture Affects Wood Flooring Products.
<http://www.woodfloorsonline.com/techtalk/woodwater1.html>.

How to Spot and Avoid Trouble with Wood Floors.
<http://www.woodfloorsonline.com/techtalk/woodwater6.html>.

Hutcheon, N. B. e Jenkins, J. H. *Some Basics Characteristics of Wood.* CBD-85. Canadian Building Digest, January 1967.
<http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd085e.html>.

Hutcheon, N. B. e Jenkins, J. H. *Some Implications of the Properties of Wood.* CBD-86. Canadian Building Digest, February 1967.
<http://www.nrc.ca/irc/cbd/cbd086e.html>.

Hutcheon, N. B. *Humidity in Canadian buildings.* CBD-1. Canadian Building Digest, January 1960.
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd001e.html>.

Installing Wood Floors Products Over Radiant Heating.
<http://www.woodfloorsonline.com/techtalk/woodwater7.html>.

International Standard ISO 5966:1982. *Documentation – Presentation of scientific and technical reports.*

International Standard ISO 7144:1986. *Documentation – Presentation of thesis and similar documents.*

Isotherm Program on-line help.

<http://www.users.bigpond.com/webbtech/isotherm.html>. Consultado em Fevereiro 2005.

Krieger, Morris. *Homeowner's Encyclopedia of Home Construction*.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ficha M1 – *Especificação de madeiras para estruturas*. LNEC 1997.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ficha M2 – *Pinho bravo para estruturas*. LNEC 1997.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ficha M8 – *Undianuno*. LNEC 1997.

Prado, Mônica E. T.; Alonso, Luís Filipe T.; Sales, Alessandra F. e Park, Kil J. *Isotermas de sorção de tâmaras: Determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos*. <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-2061>. ISSN 0101-2061. Consultado em Fevereiro 2005.

Properties of Wood and Wood Floor Characteristics.

<http://www.woodflooronline.com/techtalk/properties.html>.

Roux, Marie-Lise e Anquetil, Frédéric. *Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment*. Centre Technique du Bois et de L'ameublement – CTBA, mai 1994, ISBN 2-85684-018-3.

Sereda, P. J. *Performance of building materials*. CBD-115. Canadian Building Digest, July 1969.

<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd115e.html>. Setembro 2004.

Sereda, P. J. *The structure of porous materials*. CBD-127. Canadian Building Digest, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd127e.html>.

Sereda, P. J.; Felman. *Wetting and drying of porous materials*. CBD-130. Canadian Building Digest, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd130e.html>.

Silva, Manassés M. da; Gouveia, Josivanda P. G. de e Almeida, Francisco de A. C. *Dessorção e calor isostérico em polpa de manga*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 6, n.º 1, pp. 123-127, 2002. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, <http://www.agriambi.com.br>.

Tanaka, Toshinari. *Wood Inspection by Thermography*.
<http://www.ndt.net/article/v06n03/tanaka/tanaka.htm>.

Time, B. *Studies on hygroscopic moisture transport in Norway spruce (Picea abies). Part 1: Sorption measurements of spruce exposed to cyclic step changes in relative humidity*. Holz Roh – Werkstoff 60: pp. 271-276, 2002.

Time, B. *Studies on hygroscopic moisture transport in Norway spruce (Picea abies). Part 2: Modelling of transient moisture transport and hysteresis in wood*. Holz Roh – Werkstoff 60: pp. 405-410, 2002.

Turenne, R. G. *Shrinkage of bituminous roofing membranes*. CBD-181. Canadian Building Digest,
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd181e.html>.

Wadsö, Lars. *Studies of water vapor transport and sorption in wood*. Doctoral Dissertation, Report TVBM-1013, Department of Building Materials, Lund University, Sweden 1993.

Anexos

Anexo A

Propriedades da Madeira

A.1 Retraccção de Várias Espécies de Madeira

Tabela A.1 — Valores médios da retraccção total (tangencial e radial) de várias essências de madeira [1], [25], [26], [27], [28], [29] e [30].

Nome botânico	Designação Inglesa	Designação portuguesa	ε_t (%)	ε_r (%)
<i>Abies amabilis</i> Douglas ex Forbes <i>Abies concolor</i> Engelm	Amabilis fir Pacific silver fir White balsam White fir		7,1	3,2
<i>Acer saccharum</i> Marsh.	Hard maple Rock maple Sugar maple White maple		9,9	4,8
<i>Andira inermis</i> H. B. K.	Angelin Cabbage-bark Kuraru Red cabbage-bark	Andirá-uchi	9,8	4,6
<i>Anisoptera</i> spp.	Mersawa Krabak Pengiran Nongo Yon		9,0	4,0
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertoloni) Otto Kuntze	Parana pine	Pinho-do-paraná	7,9	4,0
<i>Aspidosperma peroba</i> Fr. All.	Peroba rosa Red peroba	Peroba	6,4	3,8
<i>Aucoumea klaineana</i> Pierre	Gaboon Okoume	Mogno do Gabão Ocumé	6,1	4,1
<i>Baikiaea plurijuga</i> Harms <i>Tectona grandis</i> L. f.	Rhodesian teak Teak	Muiumba Teca	4,0	2,2
<i>Balfourodendron riedelianum</i> Engl.	Pau marfim	Guatabú rosa Moroti Pau marfim	8,8	4,6

Nome botânico	Designação Inglesa	Designação portuguesa	ε_t (%)	ε_r (%)
<i>Calophyllum brasiliense</i> Camb.	Santa Maria	Jacareúba Guanandi	8,0	4,6
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Andiroba Crabwood Krappa	Andiroba Carapa Figueroa Mogno Demarara	7,6	3,1
<i>Cariniana</i> spp.	Albarco	Abarco Albarco Bacu Jequitiba Jequitiba rosa	5,4	2,8
<i>Caryocar villosum</i> Pers.	Piquia	Piquiá	8,0	5,0
<i>Cedrela</i> spp.(C. mexicana Roem.)	Spanish-cedar	Cedro	6,3	4,2
<i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C. C. Berg. <i>Milicia regia</i> (A. Chev.) C. C. Berg.	Iroko Tale	Amoreira Câmbala Moreira	3,8	2,8
<i>Cybistax donnell-smithii</i> Seibert	Primavera		5,1	3,1
<i>Dalbergia latifolia</i> Roxb.	Bombay blackwood Indian rosewood Sonokeling		5,8	2,7
<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Fr. All.	Bahia rosewood Brazilian rosewood Jacaranda-de-bahia Rio rosewood	Jacarandá da Baía	4,6	2,9
<i>Dialyanthera</i> spp.	Cuangare Light virola	Virola	9,4	4,2
<i>Dicorynia guianensis</i> Amsh.	Angelique	Angelica	8,8	5,2
<i>Diospyros</i> spp.	African ebony Cameroon ebony Ceylon ebony East Indian ebony Ebony Gabon ebony Kribi ebony Macassar ebony Madagascar ebony Nigerian ebony Sri lanka	Cameroon ebony Ébéne	6,5	5,5
<i>Dipterocarpus validus</i> Bl.	Apitong Bagac Keruing Kruen		10,9	5,2
<i>Dipterocarpus</i> spp.	Keruing	Keruing Queruingue	10,9	5,2

Nome botânico	Designação Inglesa	Designação portuguesa	ε_t (%)	ε_r (%)
<i>Dryobalanops</i> spp. <i>Dryobalanops aromatica</i> Gaertn. f.	Insonian kapur Kaoper Kapur Malaysian kapur Sarawak kapur		10,2	4,6
<i>Entandrophragma cylindricum</i> (Sprague) Sprague	Aboudikro Sapele	Livuitede	7,4	4,6
<i>Eperua falcata</i> Aubl. <i>Eperua grandiflora</i> Benth.	Ituri wallaba Soft wallaba Walaba Wallaba		6,9	3,6
<i>Eschweilera</i> spp.	Manbarklak		10,3	5,8
<i>Eucalyptus diversicolor</i> F. Muell	Karri	Carri Eucalipto diversicolor	10,7	7,2
<i>Eucalyptus marginata</i> Ponon. ex Sm.	Jarrah	Jarra	10,2	4,6
<i>Gmelina arborea</i> L.	Gmelina Svini	Gumari	4,9	2,4
<i>Gonystylus bancanus</i> (Miq.) Kurz <i>Gonystylus macrophyllum</i> (Miq.) Airy Shaw	melawis Ramin Ramin telur		8,7	3,9
<i>Gonystylus bancanus</i> (Miq.) Kurz <i>Gonystylus macrophyllum</i> (Miq.) Airy Shaw	Melawis Ramin Ramin telur		8,7	4,3
<i>Guibourtia arnoldiana</i> (De Wild. & Th Dur.) J. Léonard	Benge Libengi Mpenge Mutényé Penge	Mutene	8,6	5,2
<i>Guibourtia demeusei</i> (Harms) J. Léonard	Bubinga Kévazingo		8,4	5,8
<i>Hura crepitans</i> L.	Hura Sandbox	Catatuá Açacu	4,5	2,7
<i>Hyeronima alchorneoides</i> Fr. All.	Pilon	Margonçalo Sangue de boi Urucuraia	11,7	5,4
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Courbaril	Jatobá	8,5	4,5
<i>Intsia bijuga and palembanica</i>	Merbau	Ai-bessi	4,6	2,7
<i>Irvingia gabonensis</i> Baill. <i>Swietenia candollei</i> Pitt. <i>Swietenia humilis</i> Zucc. <i>Swietenia krukovi</i> Gleason <i>Swietenia macrophylla</i> King <i>Swietenia mahagoni</i> (L.) Jacq.	American mahogany Mahogany Mexican mahogany Oba	Mogno americano	5,1	3,7

Nome botânico	Designação Inglesa	Designação portuguesa	ε_t (%)	ε_r (%)
<i>Juglans nigra</i> L.	American walnut Black walnut	Nogueira preta	7,8	5,5
<i>Juniperus virginiana</i> L.	Eastern red cedar Virginian pencil cedar	Zimbro-da-Virgínia	4,7	3,1
<i>Koompassia malaccensis</i> Maing ex Benth.	Kempas		7,4	6,0
<i>Licania</i> spp.	Buruburuli Grigri Marishballi	Caraipé Macé de fogo Pintadinho	11,7	7,5
<i>Licaria</i> spp. <i>Licaria canella</i> Kosterm. <i>Licaria cayennensis</i> Kosterm.	Brown silver balli Kaneelhart		7,9	5,4
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	American red gum American sap gum Bilsted Gum Sweet gum		10,2	5,3
<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	American white wood Canary wood Tulip poplar Yellow poplar	Tulipeiro Tulipeiro-da- Virgínia	8,2	4,6
<i>Lophira alata</i> Banks ex. Gaernt. f.	Azobe Ekki	Azobé	11,0	8,4
<i>Manilkara bidentata</i> A. Chev.	Balata Bulletwood Macaranduba Massaranduba	Balata	9,4	6,3
<i>Mora</i> spp.	Mora Nato		9,8	6,9
<i>Nauclea</i> spp.	Opepe	Bilinga Gulo-maza Negulo	8,4	4,5
<i>Ochroma boliviana</i> Rowlee <i>Ochroma lagopus</i> Sw.	Balsa	Balsa	7,6	3,0
<i>Ochroma pyramidale</i>	Balsa	Balsa	7,6	3,0
<i>Ocotea rodiaei</i> Mez	Greenheart		9,6	8,8
<i>Ocotea rubra</i> Mez	Determa Red louro Wana	Louro vermelho	7,6	3,7
<i>Peltogyne paniculata</i> Pitt. <i>Peltogyne</i> spp.	Purpleheart Violet wood	Pau roxo	6,1	3,2
<i>Pericopsis elata</i> (Harms) Van Me- euwen	Afromosia	Kokrodua	6,4	3,0

Nome botânico	Designação Inglesa	Designação portuguesa	ε_t (%)	ε_r (%)
<i>Picea abies</i> H. Karsten <i>Picea omorika</i> Purk.	European spruce Serbian spruce Spruce	Espruce da Sibéria Espruce-europeu Píceia-europeia	7,5	4,3
<i>Pinus caribaea</i> Morelet	Bahamas pitch pine Caribbean longleaf pitch pine Caribbean pine Nicaraguan pitch pine		7,8	6,3
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede	Caribbean pitch pine Ocota pine Ocote pine		7,5	4,6
<i>Pinus ponderosa</i> Lawson	Ponderosa pine Western yellow pine	Pinho-de-ponderosa	6,2	3,9
<i>Pinus silvestris</i> L.	Redwood Scots pine	Casquinha Pinho silvestre	4,5	2,5
<i>Pinus strobus</i> L.	White pine Yellow pine	Pinho-branco Pinho-mole	7,4	4,1
<i>Platymiscium duckei</i> Hub. <i>Platymiscium ulei</i> Harms	Macawood Trebol	Macacaúba	3,5	2,7
<i>Prioria copaifera</i> Gris.	Cativo		5,3	2,4
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	American cherry Black cherry Cabinet cherry		7,1	3,7
<i>Pseudosindora palustris</i> Sym. <i>Sindora</i> spp.	Makatae Sepetir Sepetir paya Supa Swamp sepetir		7,0	3,7
<i>Quercus alba</i> L.	American white oak White oak	Carvalho branco americano Carvalho liso americano	10,5	5,6
<i>Quercus falcata</i> Michx. f. var <i>falcata</i> <i>Quercus falcata</i> Michx. f. var. <i>pagodaefolia</i> Ell. <i>Quercus rubra</i> L.	American red oak Cherry bark oak Northern red oak Red oak Southern red oak Spanish oak Swamp red oak	Carvalho americano Carvalho vermelho	8,9	4,2
<i>Quercus</i> spp.	Roble		11,7	6,4
<i>Quercus velutina</i> Lam.	American red oak Black oak Quercitrom oak		11,1	4,4
<i>Shorea</i> spp.	Lauan Light red seraya		8,0	3,8

Nome botânico	Designação Inglesa	Designação portuguesa	ε_t (%)	ε_r (%)
<i>Swietenia macrophylla</i>	True mahogany		4,1	3,0
<i>Symphonia globulifera</i> L. f.	Manil Manni	Anani Nianga Pitiá de lagoa	9,7	5,7
<i>Tabebuia</i> spp.	Guayacan Ipe Ipé Ipê	Caixeta Ipê pardo Ipê-preto Ipe-Tabaco Lapacho Pau d'arco	8,0	6,6
<i>Tabebuia</i> spp. <i>Roble group</i>	Mayflower Roble		6,1	3,6
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Jati Teak	Teca	5,8	2,5
<i>Terminalia superba</i> Engl. & Diels	Afara Limba	Limba Mulimba	6,2	4,5
<i>Thuja plicata</i> David Don	Western red cedar	Cedro-do-canadá Tuia-gigante	5,0	2,4
<i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum.	Arere Ayous Obeche Samba Wawa		5,4	3,0
<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carr.	Eastern hemlock		6,8	3,0
<i>Ulmus americana</i> L.	American elm White elm		9,5	4,2
<i>Virola</i> spp.	Banak Light virola		8,8	4,6